



# Modélisation et Apprentissage de la Prise de Décision dans les Organisations Productives: Approche Multi-Agents

Nadia Kabachi

## ► To cite this version:

Nadia Kabachi. Modélisation et Apprentissage de la Prise de Décision dans les Organisations Productives: Approche Multi-Agents. Calcul parallèle, distribué et partagé [cs.DC]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 1999. Français. <NNT : 1999STET4008>. <tel-00822831>

**HAL Id: tel-00822831**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00822831>**

Submitted on 15 May 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **THESE**

présentée par

**Nadia KABACHI**  
(Ingénieur en Informatique)

pour obtenir

**LE GRADE DE DOCTEUR**

de l'Université Jean Monnet  
et  
de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne  
(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

**Spécialité : INFORMATIQUE**

---

## **Modélisation et Apprentissage de la Prise de Décision dans les Organisations Productives : Approche Multi-Agents**

---

Soutenue le 15 / 01 / 1999

**Jury :**

<b>M. A. HAURAT</b>	Rapporteur
<b>M. N. COT</b>	Rapporteur
<b>Mme. B. BESOMBES</b>	Examineur
<b>M. Y. OUZROUT</b>	Examineur
<b>Mme. S. PINSON</b>	Président
<b>Mme. C. SAYETTAT</b>	Directeur
<b>M. L. VINCENT</b>	Codirecteur



# **THESE**

présentée par

**Nadia KABACHI**  
(Ingénieur en Informatique)

pour obtenir

**LE GRADE DE DOCTEUR**

**de l'Université Jean Monnet**  
et  
**de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne**  
(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

**Spécialité : INFORMATIQUE**

## **Modélisation et Apprentissage de la Prise de Décision dans les Organisations Productives : Approche Multi-Agents**

Soutenue le 15 / 01 / 1999

**Jury :**

<b>M. A. HAURAT</b>	Rapporteur
<b>M. N. COT</b>	Rapporteur
<b>Mme. B. BESOMBES</b>	Examineur
<b>M. Y. OUZROUT</b>	Examineur
<b>Mme. S. PINSON</b>	Président
<b>Mme. C. SAYETTAT</b>	Directeur
<b>M. L. VINCENT</b>	Codirecteur





*A ma mère, qui m'a montré le chemin à suivre,  
à mon enfant, avec lequel je le parcours.*

*A Lynda  
A yacine et Yacine*

*A la mémoire de papa....*

*je lui dédie ce mémoire*



## REMERCIEMENTS

Ce travail, fruit de trois années, a été réalisé à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Il n'aurait certainement jamais vu le jour sans l'aide, le soutien et le dévouement de nombreuses personnes.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur **Lucien Vincent**, Directeur de Recherche, d'avoir accepté de diriger ma thèse. La qualité de ses conseils, le degré de responsabilisation de son encadrement m'ont permis d'approfondir ma curiosité, et de développer mon goût pour la recherche.

Madame **Claudette Sayettat**, Professeur à l'Ecole des Mines et directeur de thèse, est grandement remerciée pour les nombreuses discussions qui ont contribué à la réussite de cette thèse. Qu'elle soit également remerciée pour la confiance dont elle a bien voulu faire preuve à mon égard, sa disponibilité et son aide tant scientifique qu'administrative.

Je remercie infiniment Monsieur **Norbert Cot**, Professeur à l'université de Paris V, qui a accepté d'être rapporteur de cette thèse. Je suis particulièrement honorée qu'il participe à la conclusion de ce travail, car c'est lui qui a encadré et encouragé mes premiers pas dans la recherche lors de ma formation de DEA.

Je remercie Monsieur **Alain Haurat**, Professeur à l'université de Savoie, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'en être le rapporteur.

Je remercie Madame **Suzanne Pinson**, Professeur à l'université Paris-Dauphine, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury, et de l'intérêt qu'elle a porté à mes travaux.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur, **Yacine Ouzrout**, Maître de Conférence à Lyon II, qui a co-encadré ce travail avec une grande rigueur scientifique et une disponibilité sans égal. Il a su m'encourager et m'aider sans relâches dans la poursuite de ce travail.

Je remercie également Madame **Béatrix Besombes**, Maître de Conférence à l'université Jean Monnet, pour avoir accepté d'examiner ma thèse.

Je remercie les membres de l'équipe Etude et Modélisation des Systèmes Industriels (EMSI) et de l'équipe Systèmes Multi-Agents (SMA) pour leurs aides diverses, leurs encouragements et l'intérêt qu'ils m'ont toujours témoigné. En particulier **Bertrand**

**Jullien, Marie-Agnès Girard, Patrick Burlat, Jean-Pierre Campagne, Philippe Beaune, Olivier Boissier, Frédéric Grimaud** pour les discussions fructueuses, les conseils qui m'ont permis de progresser.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Lynda Kabachi** et **Nacéra Chedri** pour le soin avec lequel elles ont lu et corrigé ce manuscrit, et leurs encouragements dans les moments difficiles.

Qu'il me soit permis d'exprimer toute ma reconnaissance et mes remerciements à **L. Brouillet, Z. Mazer, M. Barneoud, B. Bonnefoy** et **H. Sayet, P. Igier** pour l'aide qu'ils m'ont apportée durant la réalisation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui au sein du centre **SIMADE** ont su créer et entretenir une atmosphère de sympathie et de confiance dont j'ai grandement bénéficié.

Une sincère pensée à mes frères et sœurs, mes amis et tous mes proches pour leurs compréhension et leurs encouragements.

Je remercie mes parents de m'avoir élevé et de m'avoir toujours soutenu dans mes choix.

Enfin, je remercie mon fils pour sa patience, son amour et toute la joie qu'il me donne.

# **RÉSUMÉ**

L'objectif de cette thèse est de modéliser les processus de prise de décisions dans les organisations productives en mettant l'accent sur la communication, la coopération, la négociation et surtout l'amélioration par l'apprentissage du comportement des acteurs décisionnels.

Les entreprises font depuis plusieurs années des efforts importants pour étudier et développer une stratégie essentiellement orientée sur la réactivité. Cette stratégie nécessite un rapprochement entre la structure physique et la structure décisionnelle, ce qui entraîne une redistribution de la décision aux différents niveaux d'une organisation et un accroissement d'autonomie de ses acteurs décisionnels.

Pour mettre en évidence cette réalité, nous insistons sur des facteurs clefs tels que la complexité des organisations productives qui sont à l'intersection de différents domaines (économique, sociologique, technologique, etc.), les mécanismes de prise de décisions distribuées, les phénomènes d'orientation de décisions, et l'apprentissage qui est une aptitude et une faculté indispensable à tout système dynamique et évolutif.

Ainsi, dans ces travaux nous proposons premièrement la modélisation des organisations productives, et en particulier de leurs processus décisionnels en se basant sur les concepts des systèmes multi-agents, deuxièmement la modélisation et la formalisation des connaissances des acteurs décisionnels, et enfin l'apprentissage de nouvelles connaissances en vue de la prise de nouvelles décisions dans des contextes ou des situations analogues en adoptant la méthode de raisonnement à partir de cas.

Ces hypothèses sont validées par la construction d'une maquette de simulation qui repose sur l'implémentation du flux décisionnel à travers des règles de décisions et une architecture de représentation de connaissances (base de cas), et du flux physique par l'utilisation des techniques de simulation à événements discrets. Enfin cette maquette a été appliquée au cas d'une entreprise industrielle.

## **MOTS-CLÉS**

Organisation productives, Prise de décision, Systèmes Multi-Agents, Apprentissage en IAD, Raisonnement à partir de Cas.



## **ABSTRACT**

The objective of this thesis is to model the decision-making process in a productive organization, focussing on communication, cooperation, negotiation, and more particularly, the improvement of decisional actor behavior by learning.

For several years, the companies have made significant efforts to study and develop a primarily strategy oriented towards reactivity. These strategies have concentrated on establishing closer links between physical and decisional structures, which involves a redistribution of the decision at various levels of an organization and an increase in autonomy of its decisional actors.

To highlight this reality, we insist on some key factors such as the complexity of productive organization which are at the intersection of different fields (economic, sociological, technological, etc), the distributed decision-making mechanisms, the phenomenon of orientation of decision, and the learning which is an essential aptitude for all dynamic and evolutionary systems.

Thus, in this work we propose firstly to model productive organizations, and in particular their decision-making processes using the techniques of multi-agent systems, secondly to model and formalize the knowledge of decisional actors, and finally the learning of new knowledge in order to make new decisions in context of similar situations using Case Based Reasoning.

These assumptions are validated through the construction of a simulation model which is based on the implementation of decisional flows through some decision rules and a representation architecture of knowledge (base cases) and some physical flows by the use of discrete events simulation. Finally this model is applied to the case of an industrial company.

## **KEYWORDS**

Productive Organization , Decision-making, Multi-Agents Systems, Learning in DAI, Case-Based Reasoning.





## TABLE DES MATIÈRES





# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	5
TABLE DES MATIÈRES .....	8
TABLE DES FIGURES.....	14
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	18
PARTIE 1 : ÉTAT DE L'ART.....	21
CHAPITRE I.....	23
LES ORGANISATIONS PRODUCTIVES ET LA PRISE DE DÉCISION.....	23
1 INTRODUCTION .....	24
2 Organisations productives.....	24
2.1 Des systèmes de production aux organisations productives.....	24
2.2 Complexité des organisations productives.....	26
3 Le nouveau contexte industriel .....	27
3.1 Vers une organisation productive réactive.....	27
3.1.1 Réactivité.....	28
3.1.2 Intégration .....	28
3.1.3 Flexibilité.....	29
3.2 Rapprochement entre structure décisionnelle et structure physique .....	30
3.2.1 Distribution de la décision.....	30
3.2.2 Notion d'Autonomie.....	30
4 Prise de décision dans le domaine de la gestion .....	31
4.1 Du problème à la décision.....	31
4.2 Anatomie du processus de prise de décision.....	32
4.3 Classification des décisions de gestion .....	33
4.3.1 Classification par niveau.....	33
4.3.2 Classification par méthode .....	34
4.3.3 Classification synthétique.....	36
5 un modèle d'organisation productive : « Méta2 ».....	36
5.1 Modélisation en productique .....	36
5.1.1 Vision activité / processus .....	38
5.1.2 Modélisation Systémique.....	39
5.1.3 Modélisation Méta-Systémique .....	41
5.2 Description du modèle « Méta2 » .....	42
5.2.1 Centre d'Activités (CA).....	43
5.2.2 Centre de Décisions (CD).....	44
5.2.3 Les niveaux du modèle « Méta2 ».....	46
6 CONCLUSION.....	47
CHAPITRE II.....	49
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DISTRIBUÉE ET CONNAISSANCE .....	49
1 Introduction .....	50
2 l'univers de l'iad et sma.....	50
2.1 Introduction à l'IAD .....	50
2.2 Différents types d'agents.....	51
2.2.1 Agent cognitif vs réactif .....	51
2.2.2 Agent hybride .....	52
2.2.3 Discussion .....	53
2.3 Architecture d'agent cognitif .....	54
2.4 Description d'une société d'agents .....	55

2.4.1 Interaction et Coopération entre agents .....	55
2.4.1.1 Modèles de coopération .....	57
2.4.1.2 Coopération dans les organisations productives .....	57
2.4.2 Communication .....	58
2.4.2.1 Communication par partage d'informations .....	59
2.4.2.2 Communication par envoi de messages .....	60
2.4.2.3 Protocoles de communication .....	60
2.4.3 Organisation des agents .....	61
2.4.3.1 Quelques définitions d'organisation .....	61
2.4.3.2 Typologie des organisations .....	62
2.5 Distribution .....	63
3 <i>connaissance d'un agent</i> .....	64
3.1 Généralités sur la connaissance en IA .....	64
3.1.1 Acquisition de la connaissance .....	65
3.1.2 Représentation de la connaissance .....	66
3.2 Formalisation de la connaissance d'un agent .....	68
3.2.1 Introduction .....	68
3.2.2 Quelques caractéristiques d'un agent .....	69
3.2.2.1 Intention .....	69
3.2.2.2 Concept de Rationalité .....	69
3.2.2.3 Croyances .....	70
3.2.2.4 Engagements .....	70
3.3 Connaissance dans les organisations productives .....	71
3.3.1 Catégorisation des connaissances dans une entreprise .....	71
3.3.2 Connaissance collective dans une entreprise .....	72
4 <i>Apports mutuels</i> .....	73
4.1 Apports des organisations productives aux SMA .....	73
4.2 Apports de l'approche SMA aux organisations productives .....	73
5 <i>Discussion</i> .....	74
CHAPITRE III .....	75
APPRENTISSAGE EN IA, IAD, ET ORGANISATIONS PRODUCTIVES .....	75
1 <i>Introduction</i> .....	76
2 <i>apprentissage en Intelligence Artificielle (IA)</i> .....	76
2.1 Apprentissage par cœur et apprentissage par instruction .....	77
2.2 Apprentissage à partir d'observations / à partir d'exemples .....	77
2.3 Apprentissage et raisonnement par analogie .....	77
2.3.1 Formalisation du paradigme analogique .....	77
2.3.2 Apprentissage par analogie .....	79
2.3.3 Du raisonnement par analogie au raisonnement à partir de cas .....	79
3 <i>Le raisonnement a partir de cas</i> .....	80
3.1 Principes de base .....	80
3.2 Principe général du raisonnement à partir de cas .....	81
3.3 Types de raisonnement à partir de cas .....	82
3.2.1 Résolution de problèmes .....	82
3.2.2 Interprétation .....	83
3.4 Eléments du raisonnement à partir de cas .....	83
3.4.1 Cas et Mémoire .....	83
3.4.2 Indexation .....	84
3.4.3 Le raisonnement .....	85
3.4.3.1 Interprétation des données .....	85
3.4.3.2 Recherche et Extraction des cas candidats .....	86
3.4.3.3 Sélection du meilleur candidat .....	87
3.4.3.4 Utilisation/Adaptation .....	91
3.4.3.5 Evaluation .....	92
3.4.3.6 Apprentissage .....	92
4 <i>L'apprentissage en univers multi-Agents</i> .....	95
4.1 Types d'apprentissage .....	95
4.1.1 Apprentissage des compétences .....	95
4.1.2 Apprentissage de l'organisation .....	96
4.2 Techniques et méthodes d'apprentissage des compétences .....	96
4.2.1 Apprentissage par Renforcement .....	96
4.2.2 Le modèle de Sekarane et Sen .....	97
4.2.3 Le système de Sian .....	98

4.2.4 La méthode de Shaw et Whinston .....	98
5 <i>apprentissage dans les organisations productives</i> .....	99
5.1 Apprentissage subi.....	100
5.2 Apprentissage orienté.....	100
5.3 Apprentissage construit.....	100
6 <i>discussion</i> .....	101
<b>PARTIE 2 : MAC1 ET MAC2.....</b>	<b>103</b>
<b>CHAPITRE IV .....</b>	<b>105</b>
MODÈLE D'AGENTS COGNITIFS : MAC1 .....	105
1 <i>Introduction</i> .....	106
2 <i>Architecture d'un agent</i> .....	107
2.1 Connaissances d'un agent.....	107
2.1.1 Connaissances du domaine.....	108
2.1.1.1 Objets du domaine.....	108
2.1.1.2 Expertises du domaine.....	109
2.1.2 Connaissances de contrôle.....	109
2.1.2.1 Rationalités et décisions .....	110
2.1.2.2 Intentions.....	110
2.1.2.3 Les informations perçues.....	111
2.1.2.4 Croyances .....	111
2.1.2.5 Engagements .....	112
2.1.3 Les connaissances de communication.....	112
2.1.3.1 Objets de communication.....	112
2.1.3.2 Expertises de communication.....	113
2.2 Fonctionnalités d'un agent.....	113
2.2.1 Module de Perception.....	113
2.2.2 Prise d'engagement.....	114
2.2.3 Communication .....	115
2.3 Cycle d'un agent .....	117
3 <i>Société d'Agents</i> .....	118
3.1 Organisation.....	119
3.1.1 Structure organisationnelle verticale .....	119
3.1.2 Structure organisationnelle horizontale .....	120
3.1.3 Structure organisationnelle de type « Effet de Groupe » .....	120
3.2 Interaction vs Communication .....	120
3.2.1 Dimension structurelle de la communication.....	121
3.2.2 Dimension décisionnelle de la communication .....	123
3.3 Coopération, Négociation, Résolution de Conflits .....	125
4 <i>Conclusion</i> .....	127
<b>CHAPITRE V.....</b>	<b>129</b>
MODÈLE D'AGENTS COGNITIFS : MAC2 .....	129
1 <i>Introduction</i> .....	130
2 <i>De mac1 a mac2</i> .....	130
2.1 Architecture d'un agent de « MAC2 » .....	130
Examinons le rôle de ce module dans le cadre des relations de l'agent avec la société qui l'entoure.....	131
2.2 Fonctionnement d'un agent .....	131
3 <i>Cycle d'apprentissage d'un agent</i> .....	132
3.1 Description d'un cas .....	132
3.2 Organisation des cas .....	133
3.3 Etapes du module d'apprentissage de l'agent .....	134
3.3.1 Recherche et extraction des cas similaires .....	136
3.3.1.1 Identification des descripteurs.....	136
3.3.1.2 Recherche des cas.....	136
3.3.1.3 Sélection des cas similaires .....	136
3.3.2 Affinage.....	137
3.3.3 Adaptation et révision.....	138
3.3.4 Apprentissage .....	139
4 <i>Interactions pour l'aide au raisonnement et à l'apprentissageE</i> .....	140
5 <i>Discussion</i> .....	142

<b>PARTIE 3 : APPLICATION.....</b>	<b>143</b>
<b>EXPÉRIMENTATION ET VALIDATION .....</b>	<b>143</b>
<b>CHAPITRE VI.....</b>	<b>145</b>
ARCHITECTURE LOGICIELLE DES MODÈLES .....	145
MAC1 ET MAC2 .....	145
1 Introduction .....	146
2 La Simulation.....	146
2.1 Introduction.....	146
2.2 Complémentarité des SMA et de la simulation à événements discrets .....	146
3 Architecture logiCièLLE.....	147
3.1 Modèle de simulation SIM'2.....	148
3.2 ILOG RULES.....	150
4 Implémentation du Modèle d'agents MAC2.....	153
4.1 La classe générique « Agent » .....	154
4.2 Fonctionnalités de l'agent .....	157
4.3 Raisonnement à partir de cas .....	160
5 Conclusion.....	164
<b>CHAPITRE VII.....</b>	<b>167</b>
EXPERIMENTATION ET .....	167
VALIDATION INDUSTRIELLE.....	167
1 Introduction .....	168
2 Présentation de l'Entreprise E .....	168
2.1 L'entreprise et son environnement .....	168
2.2 Contexte Industriel .....	169
3 Description du modèle de simulation .....	170
3.1 Processus stratégique.....	170
3.2 Processus opérationnel de traitement d'informations .....	171
3.3 Processus opérationnel de transformation physique .....	171
4 Le modèle d'entreprise a base d'agents .....	172
4.1 Architecture des agents.....	172
4.1.1 Processus stratégique .....	173
4.1.2 Processus opérationnel de traitement d'information .....	174
4.1.3 Processus opérationnel de transformation physique.....	177
4.2 Scénarios productiques.....	179
5 Exemple .....	179
5.1 Architecture décisionnelle .....	179
5.2 Données de production.....	180
5.3 Démarche et résultats.....	182
6 Conclusion.....	184
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>187</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>193</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>217</b>
ANNEXE A .....	218
Description des scénarios.....	218
ANNEXE B .....	221
GLOSSAIRE .....	221

## TABLE DES FIGURES







## TABLE DES FIGURES

### Chapitre I

<i>Figure I. 1 : Système décisionnel.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure I. 2 : Vues idéales et matérialistes des modèles.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure I. 3 : Modèle de Décision Méta-Systémique .....</i>	<i>41</i>
<i>Figure I. 5 : Modèle d'un centre d'activités.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure I. 6 : Décision vs rationalité .....</i>	<i>46</i>

### Chapitre II

<i>Figure II. 1: Les agents cognitifs vs réactifs [Reichgelt, 90].....</i>	<i>52</i>
<i>Figure II. 2 : Principales architectures d'agents [Ferber, 95].....</i>	<i>55</i>
<i>Figure II.3 : Communication par Partage d'Informations .....</i>	<i>60</i>
<i>Figure II. 4 : Connaissance d'une entreprise.....</i>	<i>72</i>

### Chapitre III

<i>Figure III. 1 : Concepts descriptifs du paradigme analogique .....</i>	<i>78</i>
<i>Figure III. 2 : Architecture classique d'un CBR .....</i>	<i>85</i>
<i>Figure III. 3 : Mesures de similarité locale.....</i>	<i>90</i>
<i>Figure III. 4 : Mesures de similarité globale .....</i>	<i>90</i>

### Chapitre IV

<i>Figure IV. 1 : Du Centre de Décision à l'Agent Cognitif.....</i>	<i>106</i>
<i>Figure IV. 2 : Architecture fonctionnelle d'un agent cognitif.....</i>	<i>107</i>
<i>Figure IV. 3 : Connaissances du domaine .....</i>	<i>108</i>
<i>Figure IV. 4 : Module de Perception.....</i>	<i>113</i>
<i>Figure IV. 5 : Module de Prise d'engagement .....</i>	<i>114</i>
<i>Figure IV. 6 : Algorithme de Formalisation.....</i>	<i>114</i>
<i>Figure IV. 7 : Algorithme de Conception .....</i>	<i>115</i>
<i>Figure IV. 8 : Algorithme de Raisonnement.....</i>	<i>115</i>
<i>Figure IV. 9 : Module de Communication.....</i>	<i>116</i>
<i>Figure IV. 10 : Exemple de création et d'envoi d'un message.....</i>	<i>116</i>
<i>Figure IV. 11 : Algorithme de fonctionnement d'un agent.....</i>	<i>117</i>
<i>Figure IV. 12.a : Algorithme de perception d'événement .....</i>	<i>118</i>
<i>Figure IV. 12.b : Algorithme de traitement préliminaire d'un nouveau message.....</i>	<i>118</i>
<i>Figure IV. 13 : Structures organisationnelles .....</i>	<i>119</i>
<i>Figure IV. 14 : Communication dans MACI.....</i>	<i>122</i>
<i>Figure IV. 15 : Structure générique d'un Message et exemple d'une Requête .....</i>	<i>123</i>
<i>Figure IV. 16 : Structure d'un Message directive .....</i>	<i>124</i>
<i>Figure IV. 17 : Exemple simplifié d'une organisation productive .....</i>	<i>126</i>

## Chapitre V

<i>Figure V. 1 : Architecture d'un agent dans MAC2</i> .....	131
<i>Figure V. 2 : Description d'un Cas</i> .....	133
<i>Figure V. 3 : Arbre de cas</i> .....	134
<i>Figure V. 4 : Cycle d'apprentissage d'un agent dans une organisation productive</i> ....	135
<i>Figure V. 5 : Hiérarchie de tâches du raisonnement à partir de cas de l'agent</i> .....	135
<i>Figure V. 6: Quand deux cas sont-ils similaires ?</i> .....	136
<i>Figure V. 7 : Quand est ce qu'un cas sera appris ?</i> .....	139
<i>Figure V. 8 : Exemple d'interaction entre agents</i> .....	141

## Chapitre VI

<i>Figure VI. 1 : Architecture logicielle : MAC2</i> .....	148
<i>Figure VI. 2 : Interface de Gestion (Menus décisions, simulation, performances)</i> .....	149
<i>Figure VI. 3 : Ilog Rules</i> .....	150
<i>Figure VI. 4 : Exemple d'une classe</i> .....	151
<i>Figure VI. 5 : Exemple d'une règle de Conception de l'agent en Ilog</i> .....	152
<i>Figure VI. 6 : Exemple d'une règle de raisonnement de l'agent en Ilog</i> .....	152
<i>Figure VI. 7 : Exemple de « packet » de règles de l'agent Stratégique</i> .....	153
<i>Figure VI. 8 : Hiérarchie d'agents</i> .....	154
<i>Figure VI. 9 : Liste des attributs de la classe Agent générique</i> .....	155
<i>Figure VI. 10 : Le fonctionnement de l'agent dans MAC2</i> .....	157
<i>Figure VI. 11 : Classification des cas selon les index intention, rationalités et décision</i> .....	161

## Chapitre VII

<i>Figure VII. 1 : Flux de fabrication et du système de gestion de l'entreprise E</i> .....	169
<i>Figure VII. 2 : Modélisation du processus stratégique de l'entreprise E</i> .....	170
<i>Figure VII. 3 : Modélisation du processus administratif de l'entreprise E</i> .....	171
<i>Figure VII. 4 : Modélisation du processus physique de l'entreprise E</i> .....	171
<i>Figure VII. 5 : Entreprise E. : Modèle à simuler</i> .....	172
<i>Figure VII. 6 : Scénario de déclinaison de directives</i> .....	180
<i>Figure VII. 7 : Exemple d'atelier de production</i> .....	181
<i>Figure VII. 8 : Arbre de cas de l'agent ordonnancement</i> .....	183

## INTRODUCTION GÉNÉRALE





## INTRODUCTION GENERALE

Cette introduction a pour objectif de synthétiser en tout premier lieu la problématique dans laquelle nous nous plaçons et les motivations qui nous ont poussées à la réalisation de ces travaux, d'exposer nos objectifs, et enfin de décrire l'organisation de ce mémoire.

### 1 Problématique et motivations

Les entreprises font depuis plusieurs années des efforts importants pour étudier et développer une stratégie essentiellement orientée sur la réactivité (veille technologique, conception simultanée, flexibilité, etc.) de manière à faire face à un environnement, de plus en plus instable et imprévisible.

Parmi les différentes politiques mises en oeuvre, nous nous sommes, plus particulièrement, intéressés au concept de flexibilité, qui se traduit par la rapidité de réaction aux changements aussi bien physiques que décisionnels.

Cette stratégie nécessite un rapprochement entre la structure physique et la structure décisionnelle, ce qui entraîne une *redistribution* de la décision aux différents niveaux d'une organisation et un *accroissement d'autonomie* de ses acteurs décisionnels.

Pour représenter cette problématique, nous nous intéresserons et nous insisterons sur des facteurs clefs tels que :

- ☛ La complexité des organisations productives qui sont à l'intersection de différents domaines : économique, sociologique, technologique, etc.
- ☛ Les mécanismes de prise de décision distribuée et les phénomènes d'orientation de cette décision : la représentation des capacités cognitives, et les formalismes de représentation des connaissances des acteurs décisionnels.
- ☛ L'apprentissage, qui est une aptitude et une faculté indispensable à tout système dynamique et évolutif.

### 2 Objectifs de notre recherche

La modélisation, conceptualisation d'un problème, constitue un moyen privilégié d'appréhender la complexité des organisations productives et de montrer l'intérêt des changements organisationnels au sein de ces systèmes. En d'autres termes il s'agit de dérouler un processus complet de modélisation des organisations productives depuis une représentation formelle jusqu'à l'instanciation d'un modèle opérationnel permettant d'expérimenter les différents scénarios de changements.

Ainsi notre objectif est de proposer un modèle de compréhension des mécanismes décisionnels dans l'entreprise incluant les actes et les interrelations. Les lignes directrices de cette thèse sont :

- ⇒ la modélisation des organisations productives, et en particulier de leurs processus décisionnels ;
- ⇒ la modélisation et la formalisation des connaissances et du processus de prise de décision des acteurs décisionnels ;
- ⇒ l'étude des comportements des acteurs décisionnels dans leurs prise de décision, en mettant l'accent sur des concepts importants tels que la communication, la coopération, la négociation, etc.. ;
- ⇒ l'apprentissage, de nouvelles connaissances, des acteurs décisionnels pour améliorer leur comportement lors des prises de décisions, et en cohérence avec le système dans lequel ils évoluent.

### **3 Organisation de ce mémoire**

L'organisation de ce mémoire reflète la démarche que nous avons adoptée lors de la réalisation de notre travail. Le document est composé de trois parties (cf. fig. 1) dans lesquelles sont abordés chacun des objectifs présentés ci-dessus. Ces parties correspondent respectivement à des phases de réflexion et d'analyse, de modélisation et conception, et enfin d'implémentation et de validation.

#### **3.1 Partie 1 : Etat de l'art**

La première partie est consacrée à l'état de l'art avec pour objectifs de présenter notre réflexion sur la problématique des organisations productives en terme d'organisation et de processus de prise de décision, et de présenter les fondements théoriques et conceptuels de notre modèle MAC2. Cette partie est composée de trois chapitres :

- ⇒ le chapitre I définit les organisations productives et leur environnement, il positionne la problématique de notre travail de recherche, en mettant l'accent sur le besoin de réactivité des organisations productives. Un premier modèle de description des organisations productives est présenté dans ce chapitre. Ce modèle systémique (META2) est basé sur une représentation distribuée des processus de décisions, et une formalisation des phénomènes d'orientations des comportements des acteurs décisionnels.
- ⇒ le chapitre II décrit les fondements théoriques de notre réflexion : l'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi-agents, et montre l'adéquation de ces systèmes pour répondre à cette problématique.
- ⇒ enfin, le chapitre III montre comment améliorer le fonctionnement d'un système par le biais de l'apprentissage. Deux approches d'apprentissage sont analysées : l'approche d'Intelligence Artificielle (IA) en nous focalisant sur le raisonnement à partir de cas (CBR) / Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) et la vision économique de l'apprentissage.

### 3.2 Partie 2 : MAC1 et MAC2

Cette partie décrit la démarche que nous avons suivie pour proposer les modèles à base d'agents cognitifs MAC1 et MAC2 afin de représenter les comportements et la dynamique des systèmes industriels. Elle s'articule autour de deux chapitres :

- ⇒ le chapitre IV présente une architecture d'agents MAC1 qui va s'intégrer au modèle d'organisation productive (META2), puis décrit les comportements associés à une société d'agents tels que la communication, la coopération, la négociation, l'organisation, etc..
- ⇒ le chapitre V est consacré au fonctionnement de MAC2 qui n'est autre qu'une évolution du modèle d'agents MAC1, auquel est associé un module d'apprentissage. Notre objectif est d'assurer la réutilisation de la connaissance décisionnelle en vue de la prise de nouvelles décisions dans des contextes ou des situations analogues.

### 3.3 Partie 3 : Application : expérimentation et validation

Cette partie est composée de deux chapitres :

- ⇒ le chapitre VI présente tout d'abord, les outils informatiques qui ont permis l'implémentation et la simulation du modèle MAC2. La simulation qui peut servir de base à une nouvelle technique d'évaluation de la dynamique des organisations et être à l'origine des mécanismes d'apprentissage. Ensuite, ce chapitre décrit la manière dont le modèle est implémenté.
- ⇒ le chapitre VII vérifie la validité du modèle proposé sur un exemple représentatif de la problématique industrielle des PME/PMI. Et ceci, par la description d'un certain nombre de scénarios productiques.

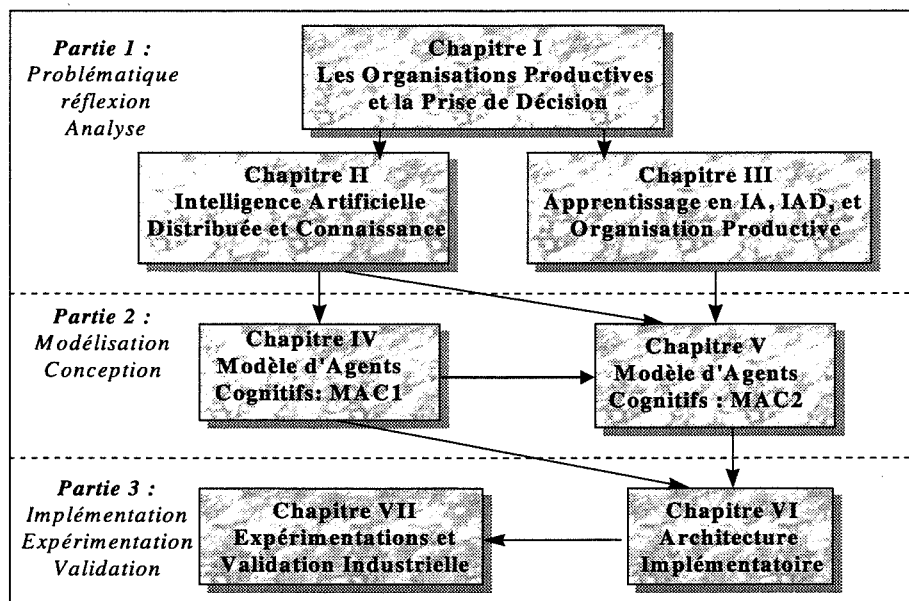



Figure 1 : Répartition et organisation des chapitres





## PARTIE 1 : ETAT DE L'ART



Tout au long de cette première partie, nous allons effectuer un tour d'horizon des travaux de trois disciplines à part entière, la gestion de production et les organisations productives, l'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi-agents, et enfin l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique.

Cette partie est composée de trois chapitres :

- ⇒ le chapitre I définit les organisations productives et leur environnement. Il positionne la problématique de notre travail de recherche, en mettant l'accent sur la réactivité des organisations productives, qui est devenue un impératif industriel majeur dans un contexte économique changeant et incertain.
- ⇒ le chapitre II décrit les fondements théoriques de notre réflexion : l'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi-agents, et montre leur adéquation pour répondre à cette problématique.
- ⇒ enfin, le chapitre III montre comment améliorer le fonctionnement d'un système par le biais d'apprentissage. Deux approches d'apprentissage sont analysées : l'approche d'Intelligence Artificielle (IA), CBR / Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) et la vision économique de l'apprentissage.



## CHAPITRE I

### LES ORGANISATIONS PRODUCTIVES ET LA PRISE DE DECISION



*L'objectif de ce chapitre est :*

☉ *de définir les organisations productives et leur environnement, qui se présente comme un contexte industriel de plus en plus instable et imprévisible.*

☉ *de montrer comment ces entreprises ont développé une stratégie d'organisation basée sur la réactivité. Cette stratégie s'exprime par un mouvement vers l'intégration, la flexibilité et l'autonomie au niveau des acteurs; elle se traduit par une distribution de la prise de décision aux différents niveaux de l'organisation, et par un rapprochement entre la structure décisionnelle et la structure physique.*

☉ *de décrire un modèle systémique et méta-systémique d'une organisation qui réponde aux objectifs de réactivité. Ce modèle intègre dans sa représentation des structures décisionnelles et des mécanismes d'orientation de la prise de décision.*



## 1 INTRODUCTION

En un peu plus d'un demi siècle, les règles du jeu industriel se sont profondément modifiées, et le contexte dans lequel évoluent les entreprises industrielles s'est transformé. Il se traduit par des demandes de plus en plus exigeantes en terme de délais de livraison, de cycle de vie, de qualité, de fiabilité et de diversité de produits, par le développement rapide de méthodes de gestion, de technologies, etc..

Pour survivre dans ce nouvel environnement, les entreprises doivent faire preuve de réactivité qui leur permet de réduire les délais de réponse aux sollicitations extérieures et de s'adapter aux évolutions du marché. Cette réactivité sera abordée à travers deux axes privilégiés par les entreprises, l'intégration et la flexibilité.

Le concept auquel nous nous sommes plus particulièrement intéressés dans ces travaux est celui de la flexibilité qui peut être vue comme la capacité d'un système à réagir et à répondre, continûment dans le temps, à des variations imprévisibles de l'environnement. Ce concept fait référence à l'existence de possibilités, à l'intérieur du processus de décision, de degrés d'autonomie et de choix des acteurs leur permettant de prendre des initiatives ou de chercher des solutions innovantes.

Pour représenter et aborder cette problématique, nous insisterons sur la complexité des organisations productives, et les mécanismes de prise de décision dans ces organisations.

La modélisation qui constitue un moyen privilégié d'appréhender la complexité des organisations productives et de montrer l'intérêt des changements organisationnels au sein de ces systèmes, sera abordée plus loin (§ 5)

Ceci nous amène à étudier deux principes, la systémique et la méta-système. Ces principes ont servi de fondements théoriques au choix d'une méthode de modélisation et à la construction d'un modèle d'organisation productive « Méta2 » qui reproduit le plus fidèlement possible la réalité des entreprises actuelles, particulièrement dans les phénomènes de prise de décisions.

## 2 ORGANISATIONS PRODUCTIVES

### 2.1 Des systèmes de production aux organisations productives

*« La production est une transformation de ressources appartenant à un système productif et conduisant à la création de biens et de services. Les ressources mobilisées à cette fin peuvent être de quatre types : des équipements (bâtiments, machines, ...), des hommes (opérateurs intervenant directement dans le processus de transformation ou contribuant d'une manière ou d'une autre à son bon déroulement), des matières (matières premières, composants, ...) et des informations techniques ou procédurales (gammes, nomenclatures, consignes, procédures, ...) ou relatives à l'état du système productif ... »*

Giard [Giard, 88].

Ce miracle quotidien (la production) résulte de quelques centaines de décisions élémentaires (expédition, mise en fabrication, approvisionnement...) préparées par le traitement de plusieurs milliers d'informations (mouvements de stocks, déclaration de production, livraison...). Ces décisions et le traitement de ces informations constituent le système de gestion de production de l'unité de fabrication [Chassang, & al., 84].

La mobilisation nécessaire de ressources au sens de V. Giard puis la prise en compte des fonctions périphériques fortement impliquées décrites par M. Gibert [Gibert, 89] et A. C. Hax et D. Candea [Hax & Candea, 83] nous amènent à considérer un domaine plus étendu que la seule unité de production. Le concept d'organisation humaine y sera forcément présent.

L'importance accordée à la dimension humaine est souvent négligée dans l'étude des systèmes de production. Cette dimension a été étudiée par les théoriciens des comportements ou behavioristes comme H. Simon, R. Cyert ou J. March qui considèrent l'entreprise comme une coalition d'individus ou de groupes qui développent chacun leurs propres aspirations.

L'analyse des organisations humaines faite par J. March et H. Simon [March & Simon, 74] a permis de discerner trois grandes catégories de comportements :

- Les membres de l'organisation sont des instruments passifs capables d'assumer un travail et de recevoir des directives, mais ne sont pas susceptibles de faire preuve d'initiative ou d'exercer une influence importante.
- Les personnes viennent dans les organisations avec leurs propres attitudes, leur propre système de valeurs, leurs propres objectifs. Elles doivent donc être motivées ou stimulées pour adopter un comportement de participation au sein de l'organisation, sachant que les objectifs des personnes et ceux des organisations ne sont pas exactement parallèles.
- Les membres d'une organisation ont pour tâche de prendre des décisions et de résoudre des problèmes. La perception de ces problèmes et le processus de pensée expliquent alors le comportement.

Selon cette analyse, ces trois catégories ne sont pas contradictoires, et une analyse de comportements doit donc comporter les trois aspects « agent d'exécution », « motivations et attitudes » et « rationalité ».

Il est certain que ces trois facettes des comportements humains sont fondamentalement présentes au sein des activités de production. La nécessité de prise en compte du comportement des acteurs, de leurs savoirs et des liens relationnels qui les réunissent au sein des entreprises, conduit à préférer le concept d'*organisation productive* qui reflète bien la prégnance forte de la dimension organisationnelle en production, plutôt que d'employer le terme trop restrictif d'*unités de production*, ou encore le terme de *système productif* à connotation trop systémique. Ce changement de vocabulaire montre bien l'importance accordée à la notion d'organisation et aux acteurs qui la composent, aux relations qui les unissent et aux savoirs qui soutiennent et nourrissent leurs décisions.

Ceci nous amène à préciser ce qu'est le concept d'organisation. Une **organisation** peut être définie comme un agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité, ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus. L'organisation lie de façon interrelationnelle des éléments ou événements ou individus divers qui dès lors deviennent les composants d'un tout. Elle assure solidarité et solidité relative, donc assure au système une certaine possibilité de durée en dépit de perturbations aléatoires [Morin, 77a].

Toute organisation est caractérisée par une structure de liens hiérarchiques et fonctionnels qui assurent la stabilité, la cohésion et la dynamique du système. Elle permet de réduire la complexité en répartissant les fonctions et en assurant les liens nécessaires entre ses différents éléments [Neubert, 97].

Dans notre étude, une organisation productive comporte donc un processus de transformation que nous centrons sur l'activité manufacturière, des ressources mobilisées et une organisation qui sera le siège de comportements humains. Ces comportements humains incluent des phénomènes d'exécution simple, de motivation, et de prise de décision fondées sur des rationalités<sup>1</sup>. Les membres de toute organisation ont des besoins, des aspirations et des mobiles, et sont limités dans leurs connaissances et dans leurs aptitudes à apprendre, à résoudre les problèmes et à prendre des décisions.

## 2.2 Complexité des organisations productives

La complexité est présente dans toute organisation productive. Pour J. van Gigch [van Gigch, 74] elle est le résultat de la multiplicité et de l'enchevêtrement des interactions humaines dans une organisation. On retrouve cette approche chez J. de Rosnay [(de) Rosnay, 75] qui considère que la complexité émerge d'une organisation par la variété de ses éléments et par les interactions entre ceux-ci. Par contre pour D. Genelot [Genelot, 92], l'entreprise est complètement immergée dans ce courant de complexification, et dans une certaine mesure concentre la complexité par le fait qu'elle se trouve au carrefour de l'économique, du technique, du social. Chacun de ces domaines, déjà complexe en soi, interagit avec les deux autres dans des combinaisons mouvantes extrêmement difficiles à appréhender.

La complexité est également définie par J. Mèlèse [Mèlèse, 91] comme un caractère fondamental des organisations, qui provient de l'incapacité de les décrire et de déduire leur comportement à partir de la simple connaissance du comportement de leurs parties. J. L. Le Moigne y associe de plus la notion d'imprévisible possible : un système est complexe pour un observateur parce qu'il tient pour certain l'imprévisibilité potentielle des comportements. Et dans la même logique, l'approche sociologique des organisations réalisée par J. March et H. Simon [March & Simon, 74], ou encore par M. Crozier [Crozier & al., 77] montre que dans les comportements de groupes apparaissent en fait des phénomènes imprévisibles et inattendus.

La succession des méthodes d'organisation qui ont assailli les entreprises depuis une décennie : ateliers flexibles, groupes semi-autonomes, organisation cellulaire, cercles de

---

<sup>1</sup> Cf. chapitre I paragraphe 5.2.2



toutes natures (de progrès, de qualité, d'échange, ...), qualité totale, juste à temps, .. montrent bien qu'il n'y a pas de réponse unique à la maîtrise de la complexité [Baranger, 87].

En effet, aucune de ces méthodes n'est bonne ou mauvaise en soi, mais l'organisation est devenue l'art d'ajuster ces méthodes à des situations souvent confuses et instables, l'art de l'essai-erreur, l'art de la combinaison des diversités. L'efficacité est donc synonyme de vision stratégique claire, combinée à une grande vitesse de réaction, pour mettre ces méthodes en adéquation avec la réalité concrète dans le sens d'une performance permanente. Pour notre étude, ce caractère complexe des organisations rendra nécessaire une approche permettant de l'appréhender<sup>2</sup>.

### **3 LE NOUVEAU CONTEXTE INDUSTRIEL**

Au delà de sa complexité intrinsèque, l'entreprise manufacturière se trouve confrontée à des impératifs contradictoires tels que : livrer les clients dans les plus courts délais, minimiser les stocks et en-cours, utiliser au mieux la capacité et le personnel disponibles, minimiser les coûts de fabrication, répondre aux aspirations du personnel relatives aux conditions de travail, satisfaire aux réglementations, etc. Elle doit donc être considérée, non plus comme une organisation monolithique, où peu de place est laissée à l'autonomie et peu d'importance est accordée aux interactions entre les différents composants, mais comme un ensemble de systèmes de prise de décision, de traitements et de communications. Elle doit évoluer vers un modèle flexible et vers une organisation distribuée, dynamique et réactive.

Dans ce but, ces entreprises devront passer d'une vision monolithique et centralisée de l'information et de la décision, vers une vision répartie et distribuée, et d'une vision cybernétique vers une vision plus cognitiviste [Burlat, 96].

#### **3.1 Vers une organisation productive réactive**

Dans le contexte de production traditionnel, l'objectif des entreprises était de satisfaire, à travers un produit, un marché en relative pénurie, ce que P. Mévellec [Mévellec, 96] appelle le modèle de la standardisation, caractérisé par la production de masse de biens homogènes. Mais désormais ce contexte et les règles du jeu industriel se sont profondément modifiés. Aujourd'hui, les consommateurs entendent obtenir des fabricants des produits diversifiés, voire personnalisés. Et c'est sur leurs aptitudes à offrir au marché des produits différenciés et innovateurs que s'opère, désormais, la concurrence entre fabricants.

C'est pourquoi nous allons approfondir sous l'angle organisationnel l'étude de l'adaptation de l'entreprise à son environnement, à travers l'analyse de la réactivité et de deux axes de développement privilégiés par les entreprises : l'intégration et la flexibilité.

---

<sup>2</sup> Cf. chapitre I paragraphe 5.1

### 3.1.1 Réactivité

La notion de réactivité est apparue comme principe de pilotage pour répondre à ce nouvel environnement productif. Elle s'entend généralement comme la capacité d'un système à répondre rapidement et intelligemment aux sollicitations de son environnement et aux aléas affectant ses processus opérationnels [Neubert, 97]. Elle s'appuie sur l'exploitation d'une certaine flexibilité des ressources mises en œuvre et de leur implantation, mais aussi sur la mise en place de formes d'organisation adaptées.

Ce besoin de réactivité est d'abord l'effet d'une concurrence qui ne s'établit plus seulement sur les prix et la qualité mais également sur les délais de livraison. La rapidité de réaction à la demande commerciale est ainsi devenue un avantage concurrentiel pour l'entreprise manufacturière. La réactivité est aussi une condition nécessaire pour profiter pleinement de l'évolution technologique en incorporant rapidement les progrès techniques dans les produits ou dans les processus de fabrication, ainsi l'entreprise qui saura intégrer au plus vite les innovations possédera un avantage sur ses concurrentes. La réactivité, comme rapidité de réaction aux sollicitations extérieures, sera essentiellement la conséquence du niveau atteint par l'organisation en terme d'intégration et en terme de flexibilité.

### 3.1.2 Intégration

Aujourd'hui l'entreprise, en s'appuyant sur de nouvelles technologies qui privilégient le développement de systèmes de communication et d'interconnexion fiables et rapides, s'efforce de plus en plus de réagir en temps réel et d'offrir la meilleure qualité possible, avec le souci de décentraliser les informations, de découpler les fonctions et d'assurer dans les meilleures conditions la gestion des ressources humaines. La tendance vers l'intégration, entendue dans le sens d'une coordination parfaite des informations et des décisions, constitue sans doute le phénomène le plus marquant de cette évolution.

Le concept d'intégration qui nous intéresse correspond à la description de phénomènes apparaissant à l'intérieur de la firme. La notion d'intégration semble recouvrir plusieurs aspects [Gibert, 89] :

- la circulation plus ou moins automatique, continue des produits,
- la communication entre équipements, entre fonctions,
- la substitution de matériels informatiques à l'homme dans certaines activités de traitement de l'information, comme la prise de décision,
- l'établissement de liaisons plus étroites entre matériels,
- la coordination des opérations.

Notons que l'aspect *coordination* apparaît comme un point central des processus organisationnels. C'est pourquoi M. Gibert interprète le concept d'intégration par l'objectivation de la fonction coordination (ou gestion de l'interdépendance). Aussi, l'intégration n'est pas l'automatisation des mouvements des produits en soi, mais le fait que celle-ci puisse être coordonnée de façon automatique avec d'autres fonctions concourant à la production.

Nous avons vu que l'intégration était un axe privilégié de développement

organisationnel des systèmes de production pour répondre en terme de réactivité à l'instabilité de leur environnement. Cette recherche d'intégration s'accompagne également d'un besoin de flexibilité que nous allons à présent décrire.

### 3.1.3 Flexibilité

Le maître mot de la période récente est logiquement devenu celui de la flexibilité, caractérisant précisément l'aptitude des entreprises à s'adapter à un environnement incertain.

La flexibilité est bien plus qu'un critère annexe, elle devient l'objectif primordial autour duquel s'articule l'organisation productive [Cohendet et Llerena, 90]. Elle peut alors être définie comme l'aptitude et la rapidité d'un système industriel à créer et à gérer la variété de façon économique et continue, afin de s'adapter aux changements de l'environnement, externe, tout en maintenant son équilibre [Okongwu, 90].

Dans la définition des objectifs de l'entreprise, la flexibilité, comme caractéristique d'un système, est exprimée par les termes d'adaptation instantanée aux variations de la demande.

Plusieurs typologies de flexibilité ont été proposées, elles peuvent être regroupés dans deux classes : A et B.

#### Classe A

- la flexibilité potentielle [Erschler & Tersac, 88], reposant sur les potentialités offertes par les ressources mises en œuvre au sein d'une activité ; ce type de flexibilité est aussi appelé flexibilité des moyens lorsqu'on s'intéresse au système physique de production. Il est alors lié à la nature et aux capacités des ressources mises en œuvre dans la production.
- la flexibilité opérationnelle, correspond à la capacité d'une organisation ou d'un individu à utiliser la flexibilité potentielle afin d'adapter la conduite de ses activités à des variations [Neubert, 97].

En terme de choix organisationnel, la flexibilité opérationnelle s'inscrit dans un cadre rapprochant l'activité de décision des acteurs (raccourcissement des boucles de pilotage) et développant leur activité cognitive et leurs compétences.

Cette flexibilité est à rapprocher de ce que certains auteurs appellent la flexibilité dynamique qui est la capacité du système à réagir et à répondre, continûment dans le temps, à des variations imprévisibles d'environnement, et donc non modélisable *a priori*. D'après G. Neubert, elle fait référence à l'existence de possibilités à l'intérieur du processus de décision, de degrés d'autonomie et de choix des acteurs leur permettant de prendre des initiatives ou de chercher des solutions innovantes.

En ce sens, la flexibilité dynamique fait appel à des processus d'apprentissage au moment de l'apparition de l'événement, et relève donc de l'aptitude de l'organisation (ou système productif) à s'adapter dynamiquement à des situations nouvelles [Ouzrout, 96].

## **Classe B**

Flexibilité stratégique, tactique et opérationnelle (physique) selon qu'elle concerne le long terme, le moyen terme ou le court terme. : cette flexibilité qui peut donc intervenir à tous les niveaux de l'entreprise a été structurée selon la typologie de décision de R. Anthony :

- la flexibilité stratégique mesurera la rapidité de l'entreprise à concevoir et à fabriquer de nouveaux produits pour répondre aux modifications de la demande du marché.
- la flexibilité tactique, liée à la gestion des ressources correspondra notamment à la capacité d'intégrer de nouvelles technologies en terme d'équipements de production et à la capacité de modifier aisément des produits existants.
- la flexibilité opérationnelle fera référence aux possibilités d'effectuer des changements rapides dans les séries fabriquées, aussi bien en terme de volume de production qu'en terme de variété des produits.

## **3.2 Rapprochement entre structure décisionnelle et structure physique**

Dans le contexte industriel actuel (marché variable, concurrence, etc.) qui se démarque fortement de la production de masse (Taylorisme), les entreprises, comme on vient de le souligner, doivent être « réactives ». La clef de cette réactivité vient d'une nouvelle vision de l'entreprise dans laquelle il y a plus d'*autonomie* et de flexibilité au niveau des acteurs. Ces concepts se traduisent par une distribution de la prise de décision aux différents niveaux de l'organisation.

### **3.2.1 Distribution de la décision**

Le rapprochement entre la structure décisionnelle et la structure physique provient donc d'un besoin d'amélioration de la réactivité des organisations productives. Pour rendre compte de ce transfert de l'activité décisionnelle vers le système physique, il faut passer d'une vision monolithique et centralisée de l'information et de la décision à une vision répartie et distribuée. En terme de modélisation, cela signifie que nous devons représenter sur un même modèle à la fois le flux de production au sens de la transformation de matière en produits finis, et les comportements de gestion qui animent ce flux physique<sup>3</sup>.

### **3.2.2 Notion d'Autonomie**

L'autonomie, qui signifie « loi propre », est indispensable aux acteurs au sein d'une organisation productive, pour développer localement des processus d'adaptation efficace.

---

<sup>3</sup> Voir le modèle Méta2 au paragraphe 5.

Au sein de cette organisation, le comportement d'un acteur est à la fois la conséquence des finalités qu'il essaie d'atteindre et des ordres directs qu'il reçoit comme suite d'instructions à exécuter depuis un niveau hiérarchique supérieur. Toutefois, il faut un certain dosage entre l'autonomie et la commande (au sens cybernétique du terme), ce qui nous pousse donc à trouver des rationalités qui s'expriment dans un nécessaire équilibre entre ces dernières (autonomie et commande).

Le développement de l'autonomie vis-à-vis de la commande et de la prise de décision provient du besoin d'amélioration de la réactivité des organisations productives face aux perturbations de leur environnement, qu'on peut interpréter comme la nécessité d'une flexibilité plus dynamique, et d'un besoin de mobilisation collective autour d'une activité d'innovation permanente qui renvoie à la sphère de création de ressources nouvelles.

## 4 PRISE DE DECISION DANS LE DOMAINE DE LA GESTION

*« La révolution que nous vivons est celle de l'art de la décision » Robert Wiener*

### 4.1 Du problème à la décision

La sagesse populaire l'a souvent noté « un problème bien posé est à moitié résolu », et la véritable responsabilité d'un gestionnaire relève davantage de son aptitude à bien identifier les vrais problèmes que de son aptitude à les résoudre [Le Moigne, 74].

En plus, pour pouvoir prendre la décision adéquate et résoudre le problème, il est important que le décideur ait une bonne perception du problème qui se pose à lui. Il doit donc savoir quand, et suivant quelles normes, une situation donnée dégénère en problème. L'identification du problème requiert une étude approfondie de la situation, un diagnostic général...

On peut alors s'interroger sur la notion de problème, qui est la différence entre un état actuel du monde et un état plus désirable. Résoudre un problème, c'est donc réduire une différence (notion classique en intelligence artificielle) . Prendre une décision c'est tendre à réduire cette différence, donc résoudre un problème. La décision qui consiste à ne rien modifier s'interprète alors comme le fait que l'état actuel est le plus désirable [Pomerol, 94].

Cette vision, plus riche que celle qui se concentre sur la décision, va du problème à la décision et fait maintenant l'objet de nombreuses réflexions. Au départ, il y a l'analyse qui paraît maintenant simpliste de Dewey<sup>4</sup> :

- quel est le problème ?
- quelles sont les actions possibles ?
- quelle est la meilleure ?

Chacun des trois points précédents soulève en fait plus de difficultés qu'il n'en résout.

---

<sup>4</sup> Dans [Simon, 77].

En résumé, avant de prendre une décision, il faut définir le problème, ce qui, d'une certaine manière, est déjà une décision ou plus exactement un « construit » contraignant la décision finale. A partir de cette construction du problème, étalée dans le temps, le décideur raisonne sur les moyens possibles de réduire la différence : « les actions ». Ces actions sont réalisées à travers des « scénarios » qui eux même sont construits en fonction des contraintes de l'environnement et des anticipations que l'on a.

Une décision est toujours prise pour faire face à une difficulté ou répondre à une modification de l'environnement, et il faut donc qu'elle soit bonne. « Mais les bonnes décisions ne poussent que sur les bons terrains : la bonne décision, en vérité ne se découvre pas, la bonne décision est un construit qui s'élabore en relation avec des finalités, avec un contexte, avec des capacités d'appropriation par le milieu » (définition, donnée par B. Roy en réponse à J.Ch. Pomerol<sup>5</sup>).

## 4.2 Anatomie du processus de prise de décision

H.A. Simon [Simon, 80] souligne que la prise de décision comporte quatre phases principales, comme le montre la figure I. 1 : il faut d'abord trouver l'occasion de prendre une décision, puis envisager les modes d'action possibles, en choisir un, et juger les choix effectués auparavant.

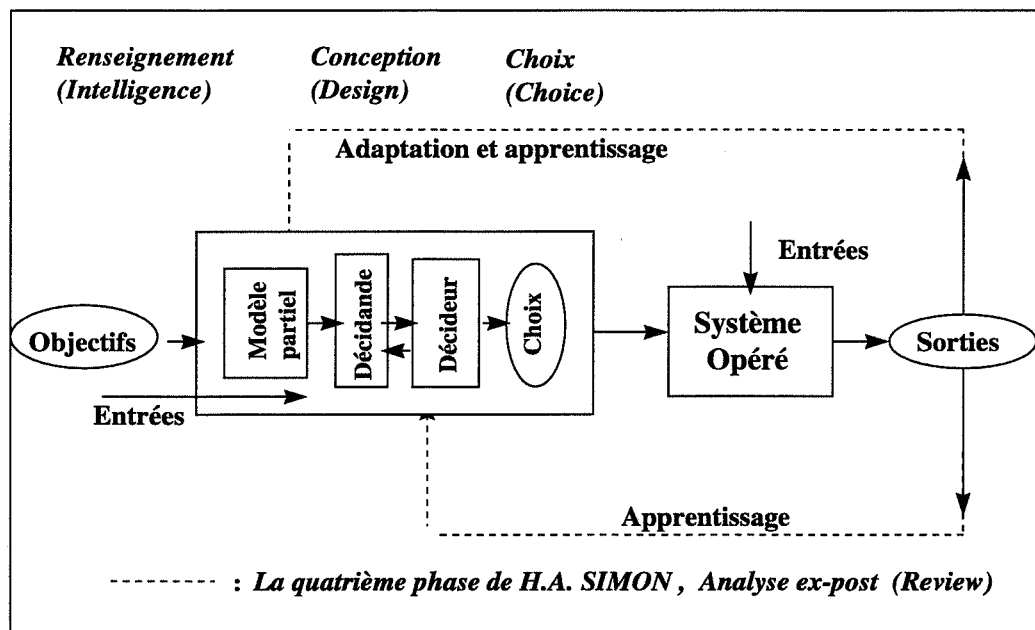


Figure I. 1 : Système décisionnel

**La première phase d'« intelligence »** ou d'« identification » (*Intelligence*) du problème est une phase essentielle qui consiste à mettre en évidence les questions après étude et scrutation de l'environnement. Selon C. Durieux [Durieux, 92], cette phase constitue le cœur de l'activité du dirigeant. Le Moigne [Le Moigne, 74] résume cette étape par l'expression « avoir l'intelligence de la situation » (... avoir identifié, dans l'environnement, les facteurs que l'on tient pour notables).

<sup>5</sup> Lors d'une conférence ; congrès AFCET, 93

**La deuxième phase** de « *modélisation* » ou « *conception* » (*Design*) consiste, à partir des informations recueillies et structurées dans la phase précédente, à concevoir des solutions compte tenu des contraintes internes et d'environnement

**La phase « choix »** (*Choice*) est celle qui, jusqu'à Simon, a le plus retenu l'attention des chercheurs, c'est l'instant du choix, instant fascinant où le destin se noue. C'est la phase la plus aisée à définir...sinon à exercer [Le Moigne, 74] : au vu des diverses solutions que le décideur a précédemment établies, il en sélectionne une qui devient sa décision, ou décide une nouvelle itération qu'il pourra faire repartir, à sa guise, à la phase *intelligence* ou à la phase *conception*. C'est en ce sens que le processus est itératif.

**La dernière phase** de Simon, est celle de « *l'évaluation des choix précédents* » (*Review*). En effet surtout du point de vue organisationnel, l'histoire de la décision ne s'arrête pas au moment où elle est prise. Beaucoup de responsables savent, plus ou moins, que la décision, au fond ce n'est pas difficile, ce qui est difficile c'est la suite, c'est-à-dire assumer sa décision ; cela veut dire que l'on comprend le contexte de la décision, ses implications, ses forces et ses faiblesses. Cela suppose, que l'on soit capable d'une analyse ex-post, ce qui est incomparablement plus difficile. Parmi les questions que l'on peut se poser à cette occasion :

- la décision a-t-elle été difficile à mettre en oeuvre ?
- si c'était à refaire, le referiez-vous ?

Autant de questions qui devraient en principe déboucher sur un apprentissage organisationnel. Une rétroaction (feed back) intelligente permet de corriger bien des erreurs.

Cette structuration permet de mettre en évidence le fait que le choix n'est qu'une des phases de la décision et probablement pas la plus importante. Selon Simon, le choix est fort contraint par les deux premières phases.

## 4.3 Classification des décisions de gestion

### 4.3.1 Classification par niveau

La classification par niveau s'inspire de la pyramide hiérarchique traditionnelle dans les organisations, et décompose les décisions selon un sens décroissant d'importance. R. Anthony [Anthony, 65] distingue ainsi les niveaux stratégique, administratif et opérationnel. L'horizon temporel de l'effet des décisions s'allonge, les temps de réponses s'accroissent et la collecte d'information se fait sur des périodes de plus en plus longues au fur et à mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie :

**les décisions stratégiques** concernent l'orientation des activités de l'entreprise et déterminent le niveau de performances demandées aux différents services ou entités. Ce sont des décisions non routinières qui agissent sur le long terme, sur la structure même

de l'unité. Elles sont relatives à la politique générale de l'entreprise, sur un horizon de 2 à 5 ans, en général. Elles concernent par exemple :

- la politique budgétaire : plan d'investissement en moyens matériels, financiers ou humains
- le choix de nouvelles orientations (introduction de produits nouveaux, de techniques récentes...)
- la mise en œuvre de campagnes publicitaires, etc..

**les décisions administratives (tactiques)** assurent l'organisation et la gestion du travail et des moyens de production sur un horizon de 6 à 18 mois environ dans le cadre des décisions stratégiques. Elles se traduisent par exemple par la définition d'un plan de production et d'un plan d'utilisation des moyens disponibles.

**les décisions opérationnelles** concernent essentiellement l'exploitation (commerciale, production) et la mise en place des ressources (utilisation). Elles régissent en détail la fabrication proprement dite pour les jours ou les semaines à venir. Elles définissent par exemple le séquençement et l'ordonnancement des opérations de fabrication sur les moyens, l'affectation des ouvriers, etc..

Toute décision prise à un niveau constitue un **objectif** pour le niveau immédiatement inférieur. De plus, un retour d'informations d'un niveau vers celui immédiatement supérieur est nécessaire afin d'évaluer voire remettre en cause les décisions prises par celui-ci.

Ces trois catégories de décisions diffèrent non seulement par l'horizon qui les caractérise et par la compétence hiérarchique du preneur de décision, mais également par le niveau de détail des informations requises pour la prise de décision [Giard, 81]. En effet, pour les décisions tactiques ou stratégiques, on raisonne en familles de produits, en centaines d'heures de travail tandis que pour les décisions opérationnelles, on travaille par composants élémentaires d'un produit et par heures ou par minutes. Ainsi, les décisions sont successivement affinées au fur et à mesure que l'on descend dans la structure.

Comme le signale bien C. Durieux [Durieux, 92], cette classification semble s'inspirer de celle, déjà ancienne, de H. A. Simon [Simon, 60] : dans la couche inférieure se trouvent « les processus de base de travail » (achat, matières premières, transformation en produits finis, expédition, stockage,...), dans la couche intermédiaire se trouvent les processus de prise de décision programmée et dans la couche supérieure les processus de prise de décision non programmée

#### 4.3.2 Classification par méthode

La classification par méthode provient des recherches entreprises par H.A Simon sur la façon dont les responsables prennent des décisions. Elles l'amènent à distinguer les deux pôles que sont les décisions programmées et les décisions non programmées. H.A Simon précise qu'il ne s'agit pas de deux types catégoriquement distincts, mais d'un continuum dont il désigne les deux extrêmes. Une décision est dite programmée



lorsque peut être formulée a priori « l'ensemble des prescriptions ou stratégies qui définiront la séquence des réponses du système considéré à un environnement plus ou moins complexe »,... ce qui correspond aux « décisions répétitives, de routine, pour lesquelles on dispose d'une procédure définie... » [Simon, 60]. Une décision non programmée au contraire est non structurée et dépendante des conditions et circonstances qui la nécessitent.

La décision non programmée selon H. Simon, a encore été décomposée par G. Gory et M. Scott Morton [Gory & Scott Morton, 71] qui ont suggéré une zone intermédiaire désignée « décision structurée »<sup>6</sup>. Ces décisions structurées correspondent au cas où, bien que l'information ne soit pas complète, « le décideur sait qu'il peut faire appel à un certain nombre d'algorithmes, de structures de raisonnement, qui seront susceptibles de l'aider grandement à avancer dans la phase de résolution ».

Il reste ensuite le domaine des « décisions non structurées » ou faiblement structurées ou encore décisions hybrides pour lesquelles la multiplicité des critères à prendre en compte peut décourager la formalisation : c'est le domaine où souvent les raisonnements de type heuristique interviendront de façon privilégiée. La décision peut à « l'extrême limite y devenir irrationnelle ou injustifiable ».

L'appel à la rationalité lors d'une prise de décision dépend de la situation informationnelle dans laquelle le décideur se trouve. Dans le cadre d'une hypothèse de rationalité absolue, le décideur doit :

- au départ avoir connaissance de l'ensemble complet des possibilités de choix,
- savoir quelle série de conséquences s'attache à chaque possibilité de choix,
- posséder une fonction de valeur d'usage ou un ordre de préférence qui classe toutes les séries de conséquences,
- sélectionner par sa décision les choix qui conduisent à l'ensemble de conséquences qu'il préfère.

Cependant, dans la plupart des cas, le choix s'effectue dans un contexte d'information incomplète. En conséquence, le décideur n'a pas la connaissance totale des possibilités de choix. De plus, les conséquences attachées à chaque possibilité de choix ne sont pas toujours certaines, mais parfois risquées ou même totalement incertaines [Simon, 60]. Aussi, pour J. March et H. Simon [March & Simon, 74], « le choix est toujours exercé au regard d'un schéma simplifié, limité et approximatif de la situation réelle, et les éléments mêmes de ce schéma ne sont pas des données mais le produit de processus psychologiques et sociologiques, comprenant les activités propres de celui qui choisit et celles des autres dans son milieu ».

En effet, dans la réalité, « la plupart des prises de décision humaines, individuelles ou organisationnelles se rapportent à la découverte et à la sélection de choix satisfaisants ». Ce contexte de prise de décision est qualifié de rationalité limitée ou procédurale, par opposition à la rationalité absolue ou substantive<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> Cité par J. L. LE MOIGNE. 1974, p. 71

<sup>7</sup> Cf. paragraphe 5, chapitre I.

### 4.3.3 Classification synthétique

Enfin, précisant davantage la typologie des décisions, G. Gory et M. Scott Morton [Gory & Scott Morton, 71] ont proposé la synthèse de la classification par niveau et de la classification par méthode.

Le croisement des niveaux stratégique, administratif et opérationnel, avec les catégories programmée, structurée et non structurée donne ainsi neuf classes possibles de décisions. On retrouvera par exemple dans la classe « opérationnel programmable » les opérations de comptabilité, de tenue de stock ou de suivi des coûts, dans la classe « administratif structurée » les décisions de sous-traitance et dans la classe « stratégique non structurée » le lancement de nouveaux produits. Les autres classes sont traditionnellement moins citées dans les modèles hiérarchisés d'organisations productives. En particulier, la classe « opérationnel non structurée » correspond à des décisions d'exploitation courante, non formalisées en raison de la multiplicité des critères à prendre en compte. Elle renvoie à une rationalité procédurale en situation d'autonomie, et nous l'utiliserons plus loin dans notre étude.

## 5 UN MODELE D'ORGANISATION PRODUCTIVE : « META2 »

A partir des réflexions faites dans les paragraphes précédents, pour pouvoir identifier et formaliser les différents composants des organisations productives, nous avons construit un modèle systémique dit de compréhension : « Méta2 ».

Le modèle « Méta2 » est le résultat des travaux que nous menons au sein de l'équipe EMSI<sup>8</sup> et qui ont donné lieu à une thèse en économie de la production [Burlat, 96], et une autre en productique [Ouzrout, 96]. Ces dernières décrivent dans les détails et spécifient les notions introduites dans cette partie. Nous allons rappeler les notions importantes de ces travaux.

### 5.1 Modélisation en productique

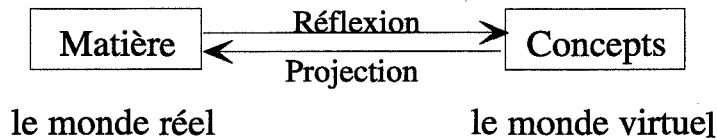
*Qu'est-ce qu'un modèle ?* Un modèle est une structuration simplifiée qui représente censément des caractéristiques et des relations significatives de la réalité sous une forme généralisée. En science, un modèle est une image stylisée et abstraite d'une portion de réalité, comme le précisent J. Erceau et J. Ferber, c'est une image « homomorphe de la réalité ».

Les modèles sont des approximations subjectives de haut niveau qui n'incluent pas toutes les observations ou mesures associées, mais font apparaître les aspects fondamentaux de la réalité tout en ignorant certains détails secondaires. Le mot « modèle » comporte deux aspects essentiels : un modèle peut refléter la réalité et

---

<sup>8</sup> EMSI : Etude et Modélisation des Systèmes Industriels.

prédire les événements et les phénomènes réels qui se heurtent à nos idées, ou il peut servir comme une forme (référence) idéale ou un phénix (parangon) avec lequel nous voulons agir sur la réalité (Fig. I. 2) [Evan, 88].



*Figure I. 2 : Vues idéales et matérialistes des modèles*

L'application des techniques de modélisation peut donc être effectuée de deux façons. Nous pouvons décrire ou « refléter » un aspect particulier du monde réel; dans ce cas, la modélisation joue un rôle explicatif fondamental dans la compréhension des systèmes de production. Alternativement, la modélisation permet d'anticiper quand les modélisateurs essaient de montrer ce que pourrait être le monde réel.

J. L. Le Moigne [Le Moigne, 90] différencie la modélisation analytique destinée à la résolution locale de problèmes compliqués mais limités, de la modélisation systémique, qui a pour objectif l'intelligibilité globale des phénomènes perçus complexes. D'un côté, la modélisation analytique renvoie à une description de la structure et s'intéresse aux éléments composant le système. De l'autre côté, la modélisation systémique renvoie à une observation des fonctions et des transformations assurées par le système, et s'intéresse aux actions qui s'y déroulent.

Pour résumer, différentes préoccupations peuvent motiver la construction d'un modèle de représentation d'un système réel, et en particulier [Dubois, 77] : - refléter le comportement du système étudié, - prédire son évolution future, - aider à la prise de décision. Donc le modèle sert alors de support pour analyser et comprendre les phénomènes se déroulant réellement au sein des organisations productives [Hollard, 94]. Lorsque le modèle est interprété par un acteur de l'organisation, il sert de plus à augmenter la connaissance et la compréhension que le système réel possède de lui-même, et participe ainsi à l'amélioration de sa performance. Les deux points, prédiction de l'évolution future et aide à la décision, sont fréquemment réalisés en entreprise à partir de modélisation du réel [Burlat, 96].

Le modèle Méta2 se fonde sur trois principes fondamentaux :

- la vision activité/processus, qui permet de gérer et d'organiser des entreprises dites réactives [Lorino, 91a].
- l'approche systémique pour appréhender la complexité des systèmes industriels, en terme de modélisation [Mélèse, 91] [Le Moigne, 84, 90]..
- l'approche méta-système pour détailler la représentation des phénomènes d'orientation des comportement [Van Gigch, 91].

### 5.1.1 Vision activité / processus

P. Lorino [Lorino, 91a] a défini la notion d'activité par tout ce qui peut être décrit par des verbes dans la vie de l'entreprise. Une activité est pour lui un ensemble de tâches élémentaires réalisées par un individu ou un groupe, faisant appel à un savoir spécifique et fournissant un extrant (une pièce fraisée, la qualification d'un fournisseur, un budget, ...), à partir d'intrants (travail, machines, informations, ...).

La modélisation d'entreprise à partir du concept d'activités est d'ailleurs à la base du programme Cost Management System développé par le CAM-I<sup>9</sup>. Cette approche propose de modéliser les activités économiquement significatives de l'entreprise, par une décomposition en fonctions (acheter, usiner, assembler, inspecter, planifier, ...) <sup>10</sup>, puis de repérer les activités élémentaires au sein de ces fonctions, et d'en identifier les coûts.

La gestion par activités devient alors un mode de coordination au sein d'une division cognitive du travail pour garantir la compatibilité des hommes impliqués dans la production du bien final (capacité de se comprendre et d'apprendre ensemble) [Moati & Mouhoud, 93].

Le pilotage par activités apparaît donc comme une réponse possible aux problèmes émergents des organisations productives.

Pour ce qui est de la notion de processus, elle correspond à l'enchaînement de plusieurs activités regroupées par des critères de complémentarité selon deux approches possibles [Zarifian, 94] :

- les activités sont physiquement reliées en un même processus par le flux de produits ou d'informations qui transitent entre elles (c'est l'exemple d'un processus de transformation de matières premières en produits finis, ou d'une chaîne de traitement de l'information) ;
- les activités sont logiquement regroupées en un même processus parce que leurs actions communes sont orientées vers le même objectif.

Cette distinction entre processus « flux » et processus « objectif » doit cependant être relativisée par le fait qu'un flux de matière ou un flux d'information est lui-même orienté selon un objectif de production de produit fini vendable ou de production d'information utilisable. Une seconde distinction établie par P. Zarifian entre processus opérationnel et processus stratégique paraît intéressante.

Un processus opérationnel, est un processus répété dans l'entreprise de manière récurrente. Il se définit comme une coopération d'activités distinctes pour la réalisation d'un objectif global, orienté client final, qui leur est commun. A tout processus opérationnel nous associons :

---

<sup>9</sup> Le Computer Aided Manufacturing International est une association qui étudie les technologies de production (automatisation) et développe des programmes de recherches sur le calcul des coûts dans l'environnement des nouvelles technologies.

<sup>10</sup> P. LORINO, 1990 : « Le projet Cost Management System du CAM-I et ses fondements », cité par P. Burlat, 1996.

- une performance formalisant l'objectif global (niveau de qualité, délai de livraison),
- une organisation qui matérialise et structure transversalement et dans la durée l'interdépendance des activités dans ce processus,
- une co-responsabilité des acteurs dans cette organisation et par rapport à la performance globale, tout en maintenant une responsabilité locale de chaque groupe d'acteurs au niveau de son activité propre.

Pourtant, les processus opérationnels eux-mêmes doivent également être remis en question dans les démarches d'amélioration permanente, et P. Zarifian introduit pour cette raison la notion de processus stratégique.

Un processus stratégique répond à un objectif de transformation forte d'un ou plusieurs processus opérationnels, dans un but stratégique, donc dans une visée de modifications des conditions de base de production de valeur pour le client. Contrairement aux processus opérationnels, les processus stratégiques n'ont pas un caractère permanent, et s'identifient à des projets ayant pour objet les processus opérationnels qu'ils transforment. Ce processus consomme des ressources, et obtient des performances qui correspondent à la fois à l'amélioration économique des processus opérationnels traités, et au progrès social lié à l'implication dans une démarche de projet de l'ensemble des acteurs mobilisés autour d'enjeux stratégiques.

Notons à ce propos, ce qui rejoint l'analyse de P. Burlat, que cette approche qui consiste à aborder les organisations comme systèmes de processus, et non comme système cybernétique classique, est également à la base du concept de reengineering [Hammer & al., 93] qui revient à redéfinir l'organisation d'une entreprise en identifiant puis en reconcevant ses processus principaux.

Nous avons donc à définir la structure de base du modèle de notre organisation productive « Méta2 », qui est un emboîtement en trois niveaux (activité, processus opérationnel, processus stratégique)<sup>11</sup>.

### **5.1.2 Modélisation Systémique**

Selon J. de Rosnay [(de) Rosnay, 75] la révolution systémique constitue une nouvelle approche de la complexité qui est caractérisée par la variété des éléments et des interactions entre ceux-ci. Il ajoute que, l'approche systémique englobe la totalité des éléments du système étudié, ainsi que leurs interactions et leurs interdépendances.

D'une manière générale, la méthode systémique vise à constituer une démarche générale pour des phénomènes perçus très divers mais représentant un certain nombre de propriétés communes. E. Morin [Morin, 77a] la définit comme étant « la capacité d'un système a, à la fois, produire et se produire, relier et se relier, maintenir et se maintenir, transformer et se transformer ».

---

<sup>11</sup> Cf. paragraphe 5.2, fig. I. 4

Les premières études sur les systèmes complexes ont été menées par L. Von Bertalanffy [Von Bertalanffy, 76] dont le résultat essentiel est le suivant : « *Un système complexe est constitué de parties indépendantes. Le comportement de l'ensemble dépend davantage des interrelations entre parties que de leur comportement propre* ». Cette approche distribuée diffère fondamentalement de l'approche classique, où l'on considère que la connaissance de chaque entité entraîne la connaissance globale.

Pour J.L. Le Moigne, un système est un objet qui, dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique. Selon lui, la modélisation d'un objet par un système peut se faire à partir d'un schéma de base à trois niveaux : « tout modèle systémique s'organise par la mise en correspondance d'un système opérant et d'un système de décision par l'intermédiaire d'un système d'information. Chacun de ces sous-systèmes est constitué de processus de type T.E.F. (Temps, Espace, Forme) :

**Le système de décision** : le système de décision est constitué de l'ensemble des éléments et relations qui effectuent le contrôle et la régulation des transformations du système technologique. Il agit donc sur le flux physique par des décisions programmées (routines ou actions), ainsi qu'en situation d'information incomplète par des décisions structurées et non structurées.

**Le système d'information** : dont le rôle est la transmission des décisions prises par le système de décision au système opérationnel. Il peut se définir comme « *l'ensemble des moyens et des communications qui assurent la saisie, la mesure, le contrôle, le stockage, le traitement et la distribution des informations* ».

**Le système physique** : Il s'agit de l'ensemble des processus physiques de production mis en oeuvre à l'aide de ressources : humaines (opérateurs), physiques (outils, machines), et techniques (méthodes et procédés de fabrication). Le système physique est traversé par le « flux de matière » que forment les produits en cours de fabrication.

P. Lorino [Lorino, 91b], introduit un niveau humain pour bien prendre en considération les effets de relations et de motivations à l'intérieur du système, et décrit ainsi une organisation productive selon quatre dimensions :

- **une dimension physique** : les équipements, la technique, les flux de matières et d'objets, l'espace et son agencement ;
- **une dimension informationnelle** : la collecte, le stockage, la circulation, le traitement des informations, les réseaux de communication ;
- **un dimension humaine** : les effectifs, les qualifications, les procédures et les systèmes destinés à gérer les ressources humaines et à induire les motivations.
- **un dimension décisionnelle** : le système de gestion, avec les processus décisionnels, les pouvoirs et les responsabilités, les règles de décision.

Nous remarquons que la décision est, dans ces modélisations, séparée du système physique, et qu'elle reste centralisée, au moins dans sa représentation. Cette vision renvoie donc toujours à une approche cybernétique de contrôle d'un système physique par un système de décision. Il est donc nécessaire d'introduire un nouveau concept qui a servi à la modélisation de Méta2 : le concept *méta-systémique*

### 5.1.3 Modélisation Méta-Systémique

A la place des modèles hiérarchiques linéaires dans lesquels les décisions sont déclinées de façon temporelle comme suites d'instructions depuis le niveau stratégique jusqu'au niveau opérationnel, nous nous dirigeons, à présent, vers des modèles intégrant l'autonomie des acteurs et représentant la consolidation progressive des différents niveaux en niveaux supérieurs englobants. En d'autres termes, et au lieu de représenter une organisation par une pyramide hiérarchique traditionnelle, on préfère inverser la pyramide et créer un modèle qui se construit par l'emboîtement successif des sous-systèmes le constituant, niveau par niveau.

Cette nouvelle approche de la représentation des organisations productives renvoie au concept plus général de *méta-systémique*. [van Gigch, 91] définit un méta-système comme un système couvrant un système de logique inférieure, et ainsi capable de formuler des propositions, de débattre de critères, ou d'exercer des régulations pour des systèmes qui sont eux-mêmes logiquement incapables de telles formulations et de tels débats, ou de telles régulations.

Un méta-système correspond donc bien à un niveau d'organisation supérieur qui englobe un niveau propre et lui donne son sens. Le concept de méta-systémique va ainsi donner un cadre théorique pour, comme nous venons de le signaler, représenter une organisation non plus par la déclinaison hiérarchique linéaire traditionnelle, mais par un emboîtement successif dans lequel le niveau supérieur donne un sens au niveau propre.

Ces concepts, qui constituent la base de la construction d'un modèle efficace de description de l'organisation, nous amène cependant à montrer l'articulation inter-niveaux, c'est-à-dire à préciser les liens qui unissent en terme de rationalité deux niveaux successifs.

J. P. van Gigch distingue, dans sa description méta-systémique des organisations, d'une part les rationalités intervenant au niveau propre (rationalités substantive et procédurale) et d'autre part celles qui interviennent au méta-niveau (rationalité structurelle et évaluative) (Fig. I. 3).

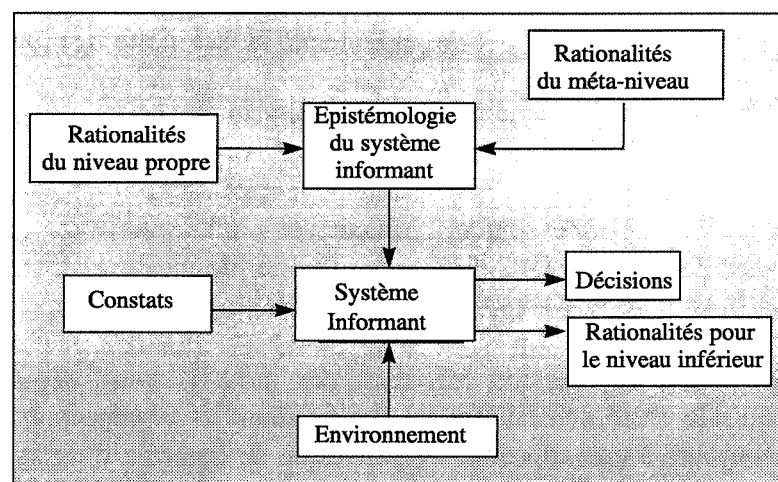


Figure I. 3 : Modèle de Décision Méta-Systémique

Il estime que quatre types de rationalités coexistent simultanément au sein des structures décisionnelles:

***une rationalité structurelle*** qui oriente la constitution de la structure de prise de décision. Elle se réfère à la question de savoir quel type de décision doit être prise, comment, quand et par qui. Exemples : Rs: « possibilité de réorganiser le processus administratif »,

***une rationalité évaluative*** qui se réfère aux objectifs apparemment visés par les décideurs ainsi qu'aux critères d'évaluation des résultats. Exemples : Re : « réduire les délais de production », « éviter la rupture des stocks ».

***une rationalité substantive*** qui est constituée à partir d'un ensemble de connaissances appartenant à un paradigme. Cette rationalité renvoie à la substance du savoir et permet de guider les actions. J. P. van Gigch cite comme exemple de rationalité substantive les règles juridiques, ou encore les connaissances techniques.

***une rationalité procédurale*** qui renvoie au problème de la mise en oeuvre des procédures de prise de décision. Elle détermine la manière dont va raisonner l'acteur décisionnel face à une situation donnée.

En résumé et comme le note J. P. van Gigch, la rationalité structurelle renvoie à la structure, la rationalité substantive au contenu, la rationalité procédurale à la forme et la rationalité évaluative aux objectifs des décisions.

Des quatre rationalités de J. P. van Gigch, pour le modèle « Méta2 » nous<sup>12</sup> n'avons conservé que les rationalités structurelle et évaluative qui sont du méta-niveau et qui renvoient à la structure de la prise de décision et aux objectifs des décisions. Les rationalités du niveau propre font partie de l'espace « connaissances du domaine », qui constitue un des thèmes importants de cette thèse.

## 5.2 Description du modèle « Méta2 »

Le modèle « Méta2 »<sup>13</sup> est issu d'une synthèse entre les fondements des concepts systémique et méta-système.

La description détaillée (fig. I. 4) des « Centres de Décision » illustre le fait que l'autonomie des acteurs décisionnels intègre certains concepts cognitifs (connaissances du domaine, rationalités, intentions propres, informations perçues, décisions résultant d'un processus de raisonnement). Ces centres de décision vont piloter et gérer les centres d'activités de l'entreprise à différents niveaux (distribution).

---

<sup>12</sup> Equipe Etude et Modélisation des Systèmes Industriels

<sup>13</sup> Décrit en détails par P. Burlat et Y. Ouzrout.



Le modèle Méta2 décrit une organisation en trois niveaux principaux : le niveau activité, le niveau processus opérationnel, et le niveau processus stratégique ou projet. A chacun des niveaux sont associés des flux technologiques et informationnels qui vont circuler à travers des modules élémentaires de type « Centre d'Activités » et « Centre de Décisions » (fig. I. 4).

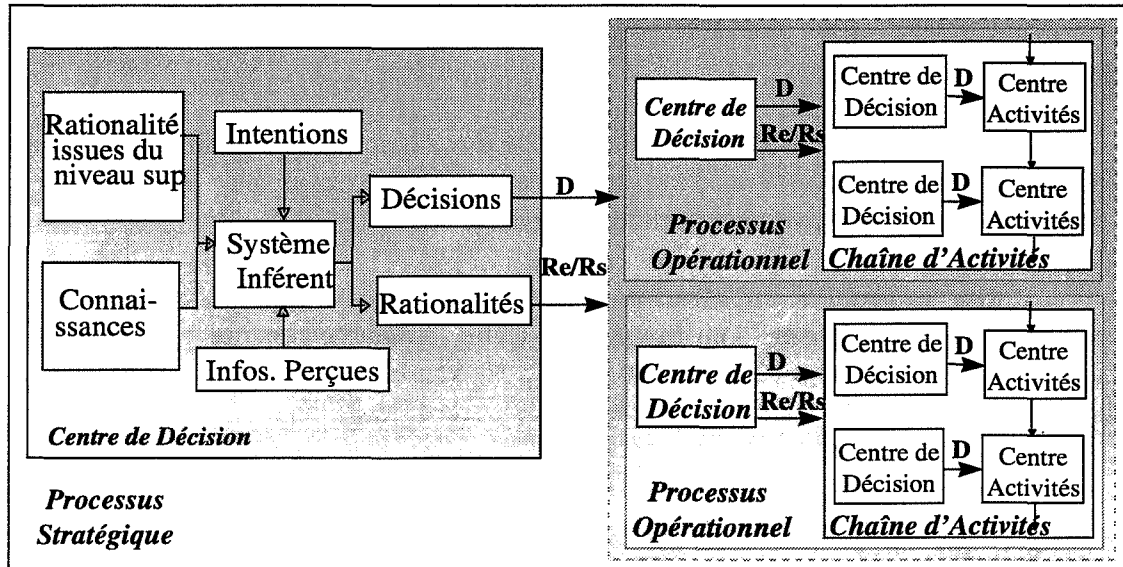


Figure I. 4 : Représentation du modèle « Méta2 »

Le premier niveau prend en charge la gestion de l'organisation, alors que les suivants représentent les processus opérationnels, aussi bien physique, qu'informationnel ou administratif, de l'entreprise.

Ainsi, comme nous venons de le mentionner, la structure de base du modèle est le couple type « Centre d'Activités » et « Centre de Décisions » :

### 5.2.1 Centre d'Activités (CA)

Un centre d'activités regroupe un ensemble de tâches élémentaires réalisées par un individu ou par un groupe, faisant appel à un savoir spécifique et fournissant un extrant (une pièce fraisée, la qualification d'un fournisseur, un budget, ...) à partir d'intrants (travail, machines, informations, ...). Un centre d'activités transforme donc, par une ou plusieurs actions, un flux physique ou un flux d'informations (Fig. I. 5).

Le flux dont la transformation correspond à la mission première du centre d'activités sera nommé flux principal. Il peut être complété par des entrées secondaires de nature physique (outillages, énergie, ...) ou informationnelles (gammas, ...), nécessaires à l'activité de transformation. Il peut également produire des sorties secondaires physiques (rebuts, déchets, etc...) ou informationnelles (documents validés, ...).

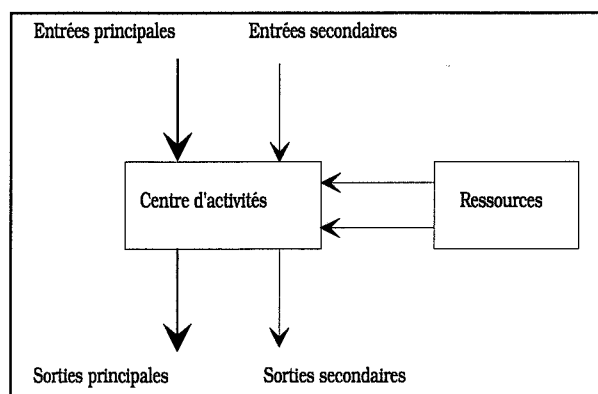


Figure I. 5 : Modèle d'un centre d'activités

### 5.2.2 Centre de Décisions (CD)

C'est un module qui oriente l'action d'un centre d'activités. Il possède des intentions propres qui vont intervenir dans son comportement, un espace de connaissances, et un système inférent qui construit des décisions s'appliquant au centre d'activités, à partir de rationalités de niveau supérieur, de ses intentions propres et de ses connaissances (Fig. I. 4 ).

Nous allons successivement décrire les éléments qui composent ce module :

**Rationalités**, les rationalités spécifiquement représentées dans Méta2 sont les rationalités évaluative et structurelle que le centre de décision recevra depuis un méta-niveau, pour évaluer et structurer sa prise de décision, et enverra lui même au niveau inférieur après certaines transformations.

**Connaissances**, la connaissance est la matière grise du centre de décision, elle est structurée en trois niveaux selon la classification issue des travaux de J. Rasmussen [Rasmussen, 83]<sup>14</sup> : la connaissance routinière qui se manifeste par des actions automatiques en contexte de situations répétitives, la connaissance opérative qui est utilisée en contexte de faibles variations à l'intérieur d'un domaine connu, et la connaissance générale utilisée dans le cadre de situations nouvelles ou exceptionnelles. Ces connaissances pourront être modifiées dans le cadre d'un processus d'apprentissage<sup>15</sup>

**Informations perçues**, les informations perçues par le centre de décision proviennent soit du centre d'activités (mesure sur le flux de production, résultat d'un calcul, indicateurs de performances, etc.), soit de communications avec d'autres centres de décisions (échanges d'informations, de directives, etc. ), ou soit d'un environnement intérieur (état du système, état des autres centres d'activités, indicateurs globaux, etc. ) ou extérieur au système.

<sup>14</sup> Cf. chapitre II paragraphe 3.3

<sup>15</sup> Cf. les chapitres III et V.

Les centres de décisions perçoivent et interprètent donc l'information disponible autour d'eux, et sont dans ce sens immergés dans un bain informationnel à partir duquel ils se construisent une vision propre de leur environnement.

**Intentions**, la présence d'intention traduit le fait que le modèle Méta2 accepte que les décisions portent la marque de celui qui les prend. Une intention correspond à un but à atteindre par un centre d'activité. Ce critère individuel, éventuellement incompatible avec les rationalités évaluatives en provenance du méta-niveau, peut ainsi modifier le processus de prise de décision. Les intentions permettent de représenter des comportements individuels qui écarteraient de l'intérêt général le comportement local d'un centre d'activités, amenant ainsi une source de dysfonctionnement de l'organisation productive.

**Système inférent**, celui-ci a pour fonction d'exprimer des décisions d'action à partir de l'espace de connaissances, des rationalités données par le niveau supérieur, des intentions propres de l'acteur, et d'informations perçues. Il utilisera particulièrement les connaissances routinières et les connaissances opératives pour exécuter des procédures pré-définies de résolution de problèmes, et des connaissances générales de haut niveau lors de processus de recherche de solutions nouvelles.

**Décisions**, les décisions exprimées en sortie du système inférent permettent d'activer les actions possibles du centre d'activités. Elle sont classifiées par méthodes en décisions réflexes, décisions structurées et décisions non-structurées<sup>16</sup>, mais non par niveaux (stratégique, tactique, opérationnel), car cela renverrait à une vision déjà trop linéaire de la hiérarchie. Les décisions réflexes sont émises par le système inférent lorsqu'il reconnaît une situation déjà répertoriée, composée d'intentions habituelles, d'informations répétitives, et de rationalités stables et connues. Il utilise alors des connaissances essentiellement routinières pour construire une décision réflexe selon une procédure algorithmique. En revanche, lorsque la situation est perçue nouvelle, inhabituelle, ou encore que les informations sont incomplètes, le système inférent ne peut plus utiliser ses connaissances routinières et doit se déplacer vers les connaissances opératives, ou vers les connaissances générales si le problème est éloigné du domaine de compétences usuel<sup>17</sup>.

La frontière et la distinction principale entre décision et rationalités (proposé par L. Vincent) est qu'une décision doit être appliquée par le centre d'activité qui la reçoit, alors que la rationalité représente la directive qui permet d'orienter la prise de décision. Nous allons illustrer cette différence (entre une rationalité évaluative et une décision) à travers un exemple élémentaire (Fig. I. 6)

---

<sup>16</sup> Selon la classification de H. Simon, précisée par G. Gory et M. Scott Morton

<sup>17</sup> Dans Burlat, 96

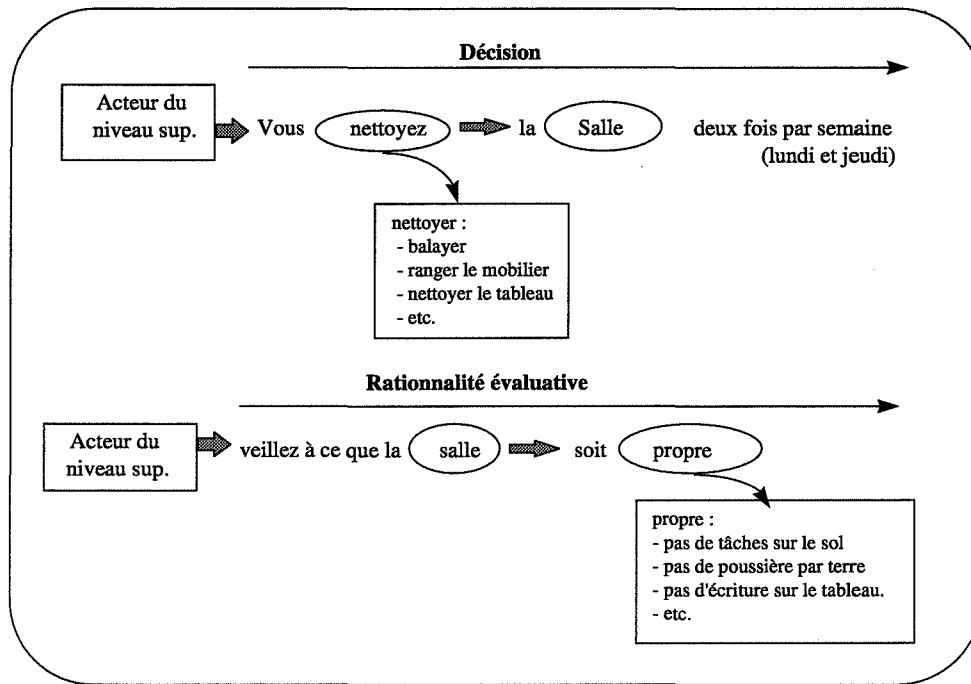


Figure I. 6 : *Décision vs rationalité*

### 5.2.3 Les niveaux du modèle « Méta2 »

Comme nous l'avons vu précédemment, le modèle Méta2 se décompose en trois niveaux d'intégration méta-systémique qui regroupent les activités, les processus opérationnels et les processus stratégiques, tels que les ont définis P. Lorino et P. Zarifian.

Le module de base défini par l'association d'un centre d'activités et d'un centre de décision est utilisé pour décrire l'enchaînement des activités de transformation des flux physique et informationnel de l'organisation productive<sup>18</sup>. Comme le montre la figure I. 4, par composition de modules en parallèle et en série, nous avons ainsi construit un modèle qui détaille les chaînes d'activités de l'entreprise, ce qui nous permettra d'obtenir une représentation de l'entreprise à travers les activités concrètes issues des tâches élémentaires rassemblées dans chaque centre d'activités.

Par ce modèle, nous avons obtenu un outil de représentation de l'activité déployée autour du flux principal de production, qui nous permettra d'analyser et de comprendre les effets du rapprochement entre flux physique et structure décisionnelle.

Le processus opérationnel est représenté par le couplage d'un centre de décision à un centre d'activités, c'est un niveau d'intégration supérieur qui donne un sens à des activités locales.

Le centre de décision pilote et oriente l'action de la chaîne d'activités, il reçoit des informations en provenance de celle-ci, et reçoit des rationalités (évaluatives et structurelles) en provenance d'un niveau supérieur. Il émet vers la chaîne d'activités des

<sup>18</sup> [Burlat, 96].

décisions directes, mais également des rationalités évaluatives et structurelles qui permettent d'orienter leur comportement (voir fig. I. 4).

Les processus opérationnels, sont des lieux de regroupement d'activités qui consomment des coûts, mais également des lieux d'élaboration de la valeur au sein de l'organisation, et ont en particulier un rôle de réorganisation permanente des activités pour répondre aux sollicitations de l'environnement. Ils représentent le trait d'union entre les objectifs de l'entreprise et le déroulement concret des activités<sup>19</sup>.

Les processus stratégiques sont de méta-niveau par rapport aux processus opérationnels, ils s'assimilent à des projets, mais des projets ayant pour « matière » les processus opérationnels. Ils confèrent à ces derniers un caractère dynamique en les faisant évoluer et en leur donnant une signification tout en les insérant dans un projet global et fédérateur. De la même manière que pour le processus opérationnel, le processus stratégique est représenté par le couplage d'un module de décision et d'un module regroupant un ensemble de processus opérationnels.

L'organisation productive, à travers le modèle « Méta2 », sera représentée par un ensemble de processus stratégiques qui transforment ses processus opérationnels, qui réorganisent eux mêmes les chaînes d'activités qui les composent, ce qui permet en particulier de relier les objectifs stratégiques avec les possibilités concrètes d'organisation des activités internes de l'entreprise<sup>20</sup>.

Egalement, dans ce modèle, l'information et la décision sont réparties sur chacun des trois niveaux de l'organisation; ce qui permettra d'évaluer les performances associées à cette distribution sur le fonctionnement de l'entreprise.

## 6 CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons essayé de positionner la problématique de notre travail, en se focalisant sur la réactivité des organisations productives, qui est devenue un impératif industriel majeur, dans un contexte économique de forte incertitude.

L'amélioration de cette réactivité, qui se traduit par l'intégration et la flexibilité, face aux perturbations de toute nature, passe par diverses voies. L'une d'entre elles consiste à rapprocher les systèmes de décision des systèmes opérants, pour mettre en oeuvre les concepts de décentralisation, d'autonomie, de négociation, de coopération etc..

Nous avons développé les caractéristiques spécifiques des mécanismes internes de la prise de décision (le schéma « intelligence-modélisation-choix-retroaction ») en faisant appel aux travaux, de psychologues et de spécialistes des études de comportements (béhavioristes) en particulier de H. A. Simon.

---

<sup>19</sup> P. Burlat, 96.

<sup>20</sup> Noter que cette représentation en trois niveaux ne prétend pas donner une description absolue de la structure d'une organisation productive.

Le modèle « Méta2 » proposé, s'appuie sur le paradigme systémique. Il permet de décrire efficacement les organisations productives, en se basant sur une représentation distribuée des processus de décisions, et une formalisation des phénomènes d'orientations des comportements des acteurs décisionnels. En effet, l'intégration de concepts méta-systémiques a permis de modéliser les rationalités, les intentions, et les motivations des centres de décisions.

Après avoir défini, notre cadre de modélisation, tant sur la problématique que sur les fondements théoriques du modèle liés à cette problématique, nous allons poursuivre notre processus de modélisation en nous focalisant sur les phénomènes cognitifs. Pour cela nous allons nous baser sur les approches de l'intelligence artificielle distribuée (dont un panorama sera dressé au chapitre II), susceptibles d'apporter des réponses pertinentes et permettant de représenter une société d'entités autonomes pour la prise de décision.



## CHAPITRE II

### INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DISTRIBUEE ET CONNAISSANCE



*Après avoir défini la problématique, et la représentation modulaire des organisations productives via le modèle systémique « Méta2 » qui reproduit le plus fidèlement possible la réalité des entreprises actuelles, nous allons décrire dans ce chapitre les fondements théoriques de notre réflexion : l'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi-agents, et montrer leur adéquation à la modélisation des phénomènes décisionnels dans les organisations industrielles.*





## 1 INTRODUCTION

L'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) est au carrefour de plusieurs disciplines, telles que la psychologie cognitive, la sociologie, la biologie, et l'informatique. Ces études sont utilisées entre autre pour modéliser et construire des systèmes informatiques dans lesquels les capacités de traitement, de représentation et de raisonnement sont distribuées dans un ensemble de sous-systèmes appelés agents. L'ensemble de ces agents constitue une société appelée Système Multi-Agents. Selon les ressources de chacun, les agents interagissent entre eux pour construire des directives en vue de la résolution de problèmes.

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu de ce que sont les systèmes d'intelligence artificielle distribuée et multi-agents. Nous insisterons sur des aspects importants pour ces systèmes tels que l'architecture des agents, l'interaction et coopération, la communication, l'organisation, etc.. ces concepts font partie des apports. Puis, notre analyse se focalisera sur le concept de connaissance en terme d'acquisition de formalisation et de représentation. Enfin, nous décrirons les apports de l'approche SMA aux systèmes complexes telles que les organisations productives et vice versa.

## 2 L'UNIVERS DE L'IAD ET SMA

### 2.1 Introduction à l'IAD

L'Intelligence Artificielle (IA) est reconnue comme étant une discipline informatique qui a pour objectif de modéliser ou de simuler des comportements humains dits intelligents tels que la perception, la prise de décision, la compréhension, l'apprentissage, etc. Elle s'attache à la construction de programmes informatiques, capables d'exécuter des tâches complexes, en s'appuyant sur une centralisation et une concentration de l'intelligence au sein d'un système unique. Mais l'IA a vite rencontré un certain nombre de difficultés, dues pour la plupart à la nécessité d'intégrer, au sein d'une même base de connaissances, l'expertise, les compétences et les connaissances d'individus différents qui, dans la réalité, communiquent et collaborent à la réalisation d'un but commun.

L'Intelligence Artificielle Distribuée<sup>1</sup> (IAD) [Bond & Gasser, 88 ; Huhns, 87 ; Erceau & Ferber, 91, Ferber, 95] est née, au début des années 80, de la volonté de remédier aux insuffisances et d'enrichir l'approche classique de l'IA en proposant la distribution de l'expertise sur un groupe d'agents, non soumis à un contrôle centralisé, devant être capables de travailler et d'agir dans un environnement commun et de résoudre les conflits éventuels. En résumé, l'IAD s'intéresse entre autre à la modélisation de comportements intelligents qui sont le produit de l'activité coopérative entre plusieurs agents, d'où la réalisation des systèmes dits « *multi-agents* ».

---

<sup>1</sup> A. Bond et L. Gasser [Bond & Gasser, 88] ont fait une bonne présentation des travaux menés dans ce domaine jusqu'en 1988. Parmi ces travaux on peut citer ceux de F. Hayes-Roth, V. Lesser, Corkill, L. Erman, W. Kornfeld, C. Hewitt,...

On appelle **SMA** un système  $\langle O, E, A \rangle$  où  $O$  est un ensemble d'objets,  $A$  est un ensemble composé d'agents,  $O$  et  $A$  étant immergés dans un environnement  $E$  [Erceau & Ferber, 93].

Yves Demazeau [Demazeau, 95] met l'accent sur deux autres axes caractérisant les SMA : *Interactions* et *Organisations*. Il découpe les SMA en quatre axes (équation 1), que nous développerons tout au long de ce chapitre:

$$(1) \text{ SMA} = \text{Agents} + \text{Environnement} + \text{Interactions} + \text{Organisations} (\text{AEIO})$$

Nous tacherons, par la suite de donner notre vision des systèmes multi-agents, en nous basant sur l'approche dite « *Vowels* » (1) de Y. Demazeau, et en analysant d'autres aspects importants tels que la coopération et la résolution de conflits.

Selon Gasser <sup>21</sup>, une société d'agents est constituée de trois éléments : un ensemble d'agents, un ensemble de tâches à réaliser, et un ensemble d'objets associés à l'environnement. Un agent peut prendre la responsabilité d'effectuer une tâche s'il en a la capacité. Il prend alors un rôle dans le groupe. La réalisation d'une tâche suppose la manipulation d'objets de l'environnement.

Ainsi, les systèmes multi-agents permettent de modéliser le comportement d'un ensemble d'entités plus ou moins expertes, plus ou moins organisées selon des lois de type social. Ces entités ou agents disposent d'une certaine autonomie, et sont immergées dans un environnement dans lequel et avec lequel elles interagissent. D'où leur structure autour de fonctions principales : de perception, de décision, d'action, de communication, de négociation, ...

## 2.2 Différents types d'agents

Les systèmes multi-agents sont en général classés en deux principales familles : les systèmes cognitifs et les systèmes réactifs. Contrairement aux systèmes réactifs, les systèmes cognitifs se rapprochent le plus du modèle de sociétés d'experts. Chaque agent cognitif a une représentation explicite de croyances, d'intentions, d'actes de langages, de modèles des autres agents, etc..

### 2.2.1 Agent cognitif vs réactif

La notion d'agent a été définie par plusieurs auteurs (tels que Demazeau & Müller, 90 ; Minsky, 94 ; Ferber, 95 ; Castelfranchi, 90 ; Shoham, 93, etc..). Comme le souligne C. Hewitt, la question « qu'est-ce qu'un agent ? » est aussi embarrassante que la question « qu'est-ce que l'intelligence ? ». Pour cela nous préférons éviter de formuler notre propre définition, nous donnerons une synthèse de toutes celles déjà données.

Pour Y. Demazeau et J.P. Müller, un agent est une entité intelligente, agissant rationnellement et intentionnellement, en fonction de ses buts propres et de l'état actuel

<sup>21</sup> [Gasser, 88 ; 90]

de sa connaissance. J. Ferber le qualifie d'entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur-elle même et sur son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un système multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance, et des interactions avec les autres agents.

D'autres auteurs [Cohen & Levesque, 88 ; Wooldridge & Jennings, 95 ; etc..] définissent un agent en terme d'état mental<sup>22</sup>, qui fait référence aux notions de croyances, connaissances, engagements vis-à-vis de lui même et des autres agents, etc..

Les systèmes multi-agents font la distinction entre « agents cognitifs<sup>23</sup> » et « agents réactifs<sup>24</sup> » : les agents cognitifs disposent d'une base de connaissances comprenant les diverses informations liées à leurs domaines d'expertise et à la gestion des interactions avec les autres agents et leur environnement. Les agents sont généralement « intentionnels » c'est-à-dire qu'ils possèdent des buts et des plans explicites leur permettant d'accomplir leurs buts. Dans ce cadre, comme le précise J. Ferber, les problèmes de coopération ressemblent étonnamment à ceux de petits groupes d'individus, qui doivent coordonner leur activité, et sont parfois amenés à négocier pour résoudre leurs conflits.

Les agents réactifs au contraire ne sont pas « intelligents » pris individuellement. Ils ne peuvent que réagir à des stimuli simples provenant de leur environnement, et leur comportement est alors simplement dicté par leur relation à leur entourage sans que ces agents ne disposent d'une représentation des autres agents ou de leur environnement. Cependant, du fait, de leur nombre, ces agents réactifs peuvent résoudre des problèmes qualifiés de complexes (cf. fig. II. 1 qui résume ces différences). Les travaux sur ces agents s'intéressent plus à la modélisation d'une société d'agents qu'à l'agent lui-même. Les analogies que les chercheurs ont établi sont celles de la vie artificielle, de l'éthologie (la fourmilière, la termitière, la ruche d'abeille), etc..

AGENTS COGNITIFS	AGENTS REACTIFS
Représentation explicite de l'environnement	Pas de représentation explicite
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire locale
Agents complexes	Fonctionnement stimulus/action
Nombre d'agents réduit	Nombre d'agents élevé

*Figure II. 1: Les agents cognitifs vs réactifs [Reichgelt, 90]*

### 2.2.2 Agent hybride

En général, la différence entre des agents réactifs et des agents cognitifs peut être expliquée par le compromis efficacité/ complexité. La complexité des systèmes réactifs

<sup>22</sup> Ce qui rejoint d'ailleurs la définition de Y. Demazeau et J.P. Müller.

<sup>4</sup> On peut citer les travaux de [Braganza & Gasser, 87 ; Vere & Bickmore, 90 ; Bussmann & Demazeau, 95 ; Ocelllo & Demazeau, 95 ; etc..].

<sup>24</sup> Parmi les travaux sur les agents réactifs, on trouve ceux de [Drogoul, 92 ; Brooks, 89 ; Agre & Chapman, 87 ; Ferber, 89 ; Bura, & al., 91].

exige le développement de nouvelles théories dans le domaine de la coopération, de la communication et de la compréhension de nouveaux phénomènes telles que l'émergence. Toutefois, il est maintenant possible de concevoir des systèmes hétérogènes comportant les deux types de comportements (cognitif et réactif) : on parlera alors d'agents hybrides.

Dans ce sens, nous pouvons citer les travaux<sup>25</sup> de [Ferguson, 92 ; Muller & Pischel, 94 ; Bussman & Demazeau, 94]. La majorité des modèles d'agents hybrides présentés par ces auteurs, propose de décomposer chaque agent en différents modules réactifs et cognitifs avec un module spécifique qui contrôle l'activation des autres modules. Cette approche est intéressante et semble apporter une solution adéquate pour modéliser les systèmes complexes dont l'environnement est dynamique, mais elle ne résout pas clairement le problème d'interaction entre les différents modules. Le problème, pour M.J. Wooldridge et N.R. Jennings [Wooldridge & Jennings, 95], est alors de définir les mécanismes et les stratégies du module de contrôle interne de l'agent pour soit gérer les interactions entre ses différents modules, soit imposer un séquençement temporel global interne à l'agent.

### 2.2.3 Discussion

Dans le cadre de ce mémoire, les agents dont il sera question, sont cognitifs, avec des capacités (cf. chap. IV) :

- de raisonnement sur des problèmes globaux et sur autrui,
- de communication avec les autres,
- d'autonomie d'action et de décision.

Nous avons déjà évoqué le concept d'autonomie dans les organisations productives (chap. I), nous allons, maintenant, voir *Qu'est ce que l'autonomie d'un agent ?* Un agent peut être doté d'une caractéristique lui permettant de réagir par les lois qu'il a lui même édictées. Cette caractéristique, qui peut être aussi synonyme d'auto-contrôle, est appelée **autonomie**. Dans la littérature, nous trouvons souvent ce terme associé à au moins quatre significations très différentes [Sichman, 95] :

⇨ **autonomie par rapport à la conception**, dans ce contexte, un agent est autonome s'il a une existence propre, indépendamment de l'existence des autres agents [Demazeau, & Muller, 90].

⇨ **autonomie par rapport à l'environnement**, un agent autonome est un agent censé fonctionner dans des environnements dynamiques et incertains, qui ne peuvent être souvent perçus que de façon imparfaite, qui peuvent changer suite à des actions qui ne sont pas contrôlées par l'agent lui même et sur lesquels les effets de ses actions ne sont pas toujours prévisibles [Nilsson, 94].

⇨ **autonomie par rapport à ses propres buts**, un agent autonome est un agent qui peut atteindre ses buts tout seul. Il n'a pas besoin a priori de coopérer avec d'autres agents. Et s'il décide de le faire, c'est à cause d'une amélioration possible de performance .

<sup>25</sup> M. Rodriguez, 94 a présenter un bon état de l'art sur les modèles d'agents hybrides.

⇒ **autonomie par rapport à ses motivations**, un agent autonome est un agent qui a le libre choix pour interagir socialement. C'est à partir du contenu de son état mental qu'il décide de coopérer ou non, etc..[Castelfranchi, 90].

Cet auteur a proposé des propriétés pour caractériser un agent autonome :

- un agent autonome à ses propres buts ;
- il est capable de prendre des décisions concernant ses propres buts ;
- il est capable de décider de façon autonome quand il doit adopter les buts des autres agents ;
- il considère l'action sociale d'adopter les buts des autres comme un moyen d'atteindre ses propres buts ;
- il contrôle l'acquisition de ses croyances et leur crédibilité par rapport à ses croyances courantes.

Par rapport à notre problématique et à l'aspect que nous voulons aborder (la prise de décision dans les organisations productives), nous conservons pour nos agents les propriétés proposées par C. Castelfranchi<sup>26</sup> (Chap. IV).

## 2.3 Architecture d'agent cognitif

Un agent cognitif dispose naturellement d'une architecture plus élaborée que celle d'un agent réactif. Mais la division cognitif/réactif n'épuise absolument pas le débat sur les architectures. D'abord parce qu'il existe une vaste gamme (fig. II. 2) aussi bien pour les agents cognitifs et réactifs, mais surtout parce que nous pouvons très bien réaliser des agents réactifs à partir d'architectures initialement destinées à des agents cognitifs et vice versa [Ferber, 95].

Type d'architecture	Approche	Type de composant	Structure de subordination
<i>Modulaire horizontale</i>	Fonction horiz.	Module	Hiérarchique
<i>Tableau noir</i>	Fonction	Tâche	Hiérarchique (méta)
<i>Subsommation</i>	Fonct. vert.	Tâche primitive	Hiérarchique
<i>Tâches compétitives</i>	Fonct. vert.	Tâche + actions primitive	Hiérarchique (compétition)
<i>Règles de production</i>	Fonct.	Règle	Hiérarchique (méta)
<i>Classifieurs</i>	Fonct. vert.	Règle	Hiérarchique
<i>Connexioniste</i>	Fonct. vert.	Neurone formel	Egalitaire
<i>Système dynamique</i>	Fonct. vert.	Relation stimuli-commande	Egalitaire

<sup>26</sup> Sous une certaine réserve, car nos agents dans leurs prises de décisions doivent aussi tenir compte des rationalités du méta-niveau (Cf. chap. IV).

Multi-agents	Objet/fonc.	Agent	Egalitaire
--------------	-------------	-------	------------

Figure II. 2 : Principales architectures d'agents [Ferber, 95]

La plupart de ces architectures peuvent s'appliquer à des agents aussi bien cognitifs que réactifs. Néanmoins, il faut tempérer cette affirmation en reconnaissant que certaines architectures, telles que les systèmes à base de tableau noir sont exclusivement réservées aux agents cognitifs, alors que les architectures de subsomption sont utilisées pour des agents réactifs.

L'architecture la plus répandue dans les SMA est l'architecture modulaire [Ferber, 95]. Elle est conçue comme un assemblage de modules par des connexions préétablies, chacun de ces modules réalise une fonction horizontale particulière. Les modules les plus courants sont :

Les fonctions perceptives et motrices s'il y a lieu; L'émission et l'interprétation des communications; La base de croyances comprenant la modélisation de l'environnement et des autres agents; La gestion des engagements; Les expertises du domaine de compétences; La gestion des buts et la prise de décision; La planification des actions.

## 2.4 Description d'une société d'agents

Que les agents s'apparentent peu ou prou à la famille des agents réactifs ou à la famille des agents cognitifs ou même hybrides, la réalisation d'un système multi-agents pose deux questions fondamentales :

❶ *comment faire communiquer, interagir et coopérer les agents entre eux ?* ou quels types de communication, de protocoles ou de langages utiliser ? comment gérer les synchronisations et la cohérence des informations qui circulent entre les agents ?

❷ *comment organiser le système ?* ou comment organiser la distribution des tâches selon les agents et le contrôle de la résolution globale du problème ? En effet, il n'existe pas de théories des organisations qui permettent de décider en fonction de l'application quelle forme d'organisation, quelles interactions entre agents... adopter<sup>27</sup>.

Nous allons tenter de répondre à ces questions en présentant différents points de vue concernant les aspects interactionnels, organisationnels, ..., d'une société d'agents.

### 2.4.1 Interaction et Coopération entre agents

Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Pour un agent, interagir avec un autre constitue à la fois la source de sa puissance et l'origine de ses problèmes [Ferber, 95].

<sup>27</sup> E. Le Strugeon en 95 a proposé une bibliothèque de modèles d'organisation, mais qui ne correspond pas vraiment à toutes les applications.

La coopération est la forme générale de l'interaction. Plusieurs études en IAD se sont attachées à la définir, mais l'ensemble de ces études est plutôt hétéroclite et il règne une certaine confusion sur la signification et la mise en oeuvre de la coopération [Bouron, 92]. La coopération doit-elle être définie en termes de buts [Durfee & al., 91], de stratégies [Cammarata & al., 83], de formes [Davis, 80] ? Désigne t-elle un comportement [Demazeau & Muller, 90], une posture [Galliers, 88] <sup>28</sup>? De plus, la définition de la coopération est généralement subordonnée aux concepts de coordination, d'organisation, de communication, et de négociation.

Ces travaux concernent des aspects de la coopération assez différents, il ne se situent pas les uns par rapport aux autres, et ne s'accordent pas sur un vocabulaire donné<sup>29</sup>. De plus la coopération est un lieu privilégié de convergence de nombreuses disciplines. De ce fait, il n'est pas évident d'en extraire une définition générale de la coopération, ce qui nous pousse à la traiter par rapport à notre problématique.

Le sociologue, K. Schmidt [Schmidt, 91] considère que les être humains coopèrent à cause de leurs capacités limitées. Pour lui, nous coopérons puisque nous ne pouvons pas accomplir une tâche individuellement ou puisque nous ne la réalisons pas rapidement et efficacement. La psychologie quant à elle [Savoyant, 84] utilise deux conditions pour définir la coopération : « *Les sujets doivent avoir le même objectif et chaque sujet doit voir le produit final comme la somme, la composition ou la combinaison des produits partiels de son ou de ses actions et de celles des autres sujets* ».

La plupart des travaux traitant de la coopération portent sur l'intérêt qu'il y a ou non à coopérer avec autrui ou sur la manière de communiquer dans les groupes. Mais alors que ces travaux mettent l'accent sur les structures du collectif, sur les relations affectives qui amènent les acteurs à coopérer et à travailler ensemble, J. Erceau souligne que l'approche IAD-SMA reformule le problème en mettant en avant les caractéristiques cognitives et comportementales nécessaires à la mise en oeuvre d'un travail collectif. Durfee [Durfee et al., 91] proposent quatre buts génériques de coopération<sup>30</sup> :

- Augmenter la vitesse de résolution des tâches par leur parallélisation ;
- Augmenter le nombre ou la portée des tâches réalisables par le partage de ressources ;
- Augmenter la probabilité d'achever des tâches par leur duplication et si possible par l'utilisation de méthodes différentes pour les réaliser ;
- Diminuer l'interférence entre tâches en évitant les interactions négatives.

J. R. Galliers [Galliers, 88] s'est intéressée à la nature et au rôle de ce qu'elle appelle postures propositionnelles qui regroupent les conflits, la coopération et l'indifférence. Ces postures connotent un but en caractérisant des types de relations sociales entre plusieurs agents et une proposition. « La coopération existe entre deux agents par rapport à une proposition quand un agent reconnaît que l'autre agent a pour but la réalisation de cette proposition et qu'il s'est engagé à résoudre ce but comme un but

---

<sup>28</sup> A ce propos T. Bouron [Bouron, 93] a fait une synthèse intéressante de ces travaux.

<sup>29</sup> Mais ces travaux n'en demeurent pas moins intéressants individuellement.

<sup>30</sup> Tiré du livre « systèmes coopératifs : de la modélisation à la conception » B. Pavard. Editions OCTARES 1994.



commun, en relation avec les autres agents qui l'ont aussi pour but et ceci suite à un choix délibéré. Ainsi la coopération existe entre deux agents par rapport à une proposition, si au moins un des deux agents est engagé dans la réalisation de cette proposition en rapport avec les autres agents pour qui elle constitue un but et, ceci, suite au fait qu'ils croient avoir un but commun.. »<sup>31</sup>. Cette définition introduit trois conditions nécessaires à la coopération : reconnaître le but d'un autre agent, s'impliquer dans sa résolution en l'adoptant comme son propre but de façon délibérée et le considérer comme un but commun.

#### 2.4.1.1 Modèles de coopération

Pour A. Vailly et M.A. Simon [Vailly & Simon, 87] , un agent peut coopérer suivant les modèles suivant :

⇒ *Coopération par partage de tâches et de résultats* : le partage de tâches nécessite de pouvoir décomposer le système initial en un ensemble de sous-problèmes pouvant être traités de façon indépendante et avec un minimum de communications entre agents. Ce type de coopération semble particulièrement adapté pour les domaines où il existe une hiérarchie de tâches ou de niveaux d'abstraction. Dans le cas où une telle indépendance des sous-problèmes n'existe pas il faut procéder par partage de résultats. Le partage de résultats n'exige pas de mécanismes de décomposition ; cette méthode est particulièrement utile dans des domaines où les résultats obtenus par un agent influencent ou contraignent fortement ceux des autres agents du système.

⇒ *Commande* : un agent supérieur décompose le problème en sous-problèmes qu'il répartit entre les autres agents, ceux-ci le résolvent et renvoient les solutions partielles à l'agent supérieur.

⇒ *Appel d'offre* : un agent supérieur décompose le problème en sous-problèmes dont il diffuse la liste. Chaque agent qui le souhaite envoie une offre ; l'agent supérieur choisit parmi celles-ci et distribue les sous-problèmes. Le système travaille ensuite en mode commande.

⇒ *Compétition* : dans ce mode coopération, l'agent supérieur décompose et diffuse la liste des sous problèmes comme dans le mode appel d'offre, chaque agent résout un ou plusieurs sous-problèmes et envoie les résultats correspondants à l'agent supérieur qui à son tour fait le tri.

#### 2.4.1.2 Coopération dans les organisations productives

Parallèlement à ce que nous venons de dire sur la coopération dans les SMA, la coopération dans les organisations productives prend une signification particulière, lorsqu'un centre de décision prend une décision, il agit sur les contraintes d'autres centres de décisions (voir modèle Méta2, chap. I § 5). Dans cette optique, une décision apparaît comme un contrat qui est proposé et vis-à-vis duquel il y a

<sup>31</sup> Tirée de [Erceau & al, 94] J. Erceau, L. CHAUDRON, J. FERBER et T. BOURON. *Systèmes personne(s)-machine(s) : patrimoines cognitifs distribués et mondes multi-agents, coopération et prise de décision collectives*. Pavard Système coopératifs de la modélisation à la conception, 1994.

engagement de la part de celui qui l'accepte. Ceci conduit, comme le précise J. Erschler [Erschler, 96], à envisager la coordination entre centres de décisions comme un processus de négociation de contraintes. De plus, sachant que tout système de décision est incomplet, il nécessite l'évaluation de son environnement par un décideur, ainsi que des échanges entre décideurs [Cohendet & Llerena, 90]. Cependant l'existence de choix local peut conduire à des décisions incohérentes avec celles prises par les autres centres de décisions ; de plus, l'interdépendance des décisions prises peut entraîner une propagation de cette incohérence au niveau du système global de production [Huguet & al., 96]. Cette manière de voir la structure décisionnelle oblige à s'intéresser aux modalités de coopération entre agents répartis dans plusieurs centres : comment s'établissent les échanges et les communications ? Comment se construisent les compromis conduisant à des décisions ? Quelle est la nature des interactions entre centres ? Quelles sont les modalités de négociation entre plusieurs centres de décision ? Ceci fera l'objet du chapitre IV.

### 2.4.2 Communication

La *communication*<sup>32</sup> désigne l'ensemble des *processus physiques et psychologiques* par lesquels s'effectue l'opération de mise en relation d'un émetteur avec un ou plusieurs récepteurs, dans l'intention d'atteindre certains objectifs [Anzieu & Martin, 68]. Elle est considérée comme une forme d'action particulière qui, au lieu de s'appliquer à la transformation de l'environnement, agit sur (modifie) les représentations mentales des agents (buts, croyances, etc.). Comme le confirme J. Erceau et J. Ferber, la communication dans l'univers multi-agents n'est plus une simple tâche d'entrée-sortie, mais doit être modélisée comme un acte pouvant influencer sur l'état des autres agents.

De ce fait, les processus physiques désignent les mécanismes d'exécution des actions (l'envoi et la réception de messages), les processus psychologiques se rapportent aux transformations opérées par les communications sur les buts et les croyances des agents.

Au sens de Ferber, la communication est un moyen ou une méthode de coopération (d'interaction), à côté de la :

- collaboration qui s'intéresse à la manière de répartir le travail et les ressources entre plusieurs agents ;
- coordination d'actions qui analyse la manière dont les actions des différents agents doivent être organisées dans le temps et l'espace de manière à atteindre les objectifs ;
- résolution de conflit par arbitrage et négociation en établissant par exemple des compromis, etc..

Les théories de la communication disponibles (ex. [Searle, 69], [Cohen & Levesque, 90]) ont pour but d'expliquer et de justifier la communication humaine. D'après T. Bouron [Bouron, 92], leur complexité et leur haut niveau d'abstraction sont tels qu'elles ne peuvent s'appliquer aux agents réalisés en informatique. Il rajoute que les facilités de

---

<sup>32</sup> Les travaux de Searle, 69 et Cohen et Levesque, 90 sur la théorie de la communication sont très intéressants, ils s'intéressent à la communication humaine.

communication sont par conséquent développées dans la plupart des systèmes multi-agents, sans fondement théorique. Elles sont dépendantes du domaine d'application.

Voyons maintenant, pourquoi les agents communiquent ? quand ? comment ? et avec qui ?

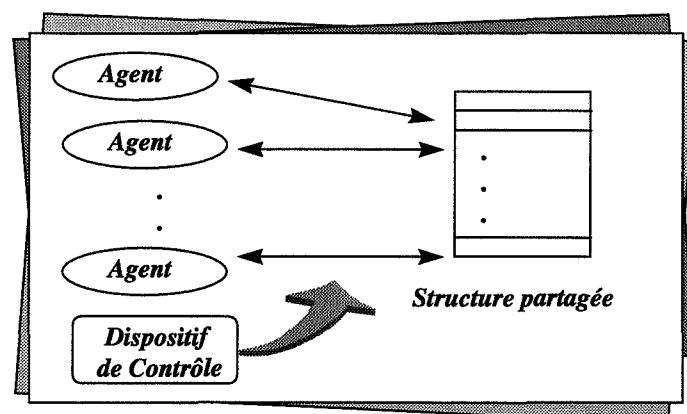
**Pourquoi communiquer ?** les agents communiquent et interagissent pour synchroniser leurs actions et pour résoudre des conflits, qui sont des conflits de ressources, de buts ou d'intérêts. Ils communiquent également pour s'aider mutuellement ou, comme le souligne J. Ferber, pour suppléer aux limites de leurs champs de perception. En effet, un agent ne peut être en relation avec tous les autres, ni équipé de tous les capteurs nécessaires à la connaissance de l'environnement.

**Quand et avec qui communiquer ?** Pour répondre à cette question, il faut identifier les situations qui vont nécessiter la communication des agents. En général, les agents communiquent lorsqu'ils sont face à un problème qu'ils ne savent pas résoudre (soit par manque de compétences ou de ressources), lorsqu'il est nécessaire de coordonner leurs actions, ou encore lorsqu'il y a un conflit entre plusieurs agents et que le conflit ne peut pas être résolu de façon déterministe. Les communications peuvent être diffusées à l'ensemble des agents ou à des agents particuliers (des agents susceptibles d'être intéressés par le message).

**Comment communiquer ?** Les procédures de communication pour véhiculer les messages (qui sont porteurs d'informations ou d'actions) entre agents sont la communication par envoi de messages, la communication par partage d'informations

#### 2.4.2.1 Communication par partage d'informations

C'est historiquement, le premier modèle de communication qui est apparu au début des années 60 [Newell, 62]. Le paragon des structures centralisées est le « tableau noir » [Hayes-Roth 85], où la mémoire partagée est vue comme un tableau sur lequel les agents écrivent, trouvent des réponses partielles, des informations. Le tableau noir est divisé en niveaux. Les agents travaillant à un niveau particulier d'abstraction ont accès à un niveau correspondant dans le tableau. Un dispositif de contrôle gère les conflits d'accès au tableau, les agents faisant les demandes d'accès de manière autonome (fig. II. 3).



*Figure II.3 : Communication par Partage d'Informations*

Le mécanisme de blackboard [Nii, 86] est constitué de trois éléments principaux :

- ⇨ *Les Sources de Connaissances (Knowledge Sources)* : la connaissance du domaine nécessaire pour la résolution du problème est partagée entre plusieurs modules appelés sources de connaissances (SC);
- ⇨ *Le blackboard* : le blackboard contient une description de l'état de la résolution sous formes d'entités appelées souvent faits, hypothèses ou noeuds. Il est organisé sous forme de niveaux qui permettent une décomposition de la description de la solution en niveaux d'abstraction.
- ⇨ *Le Contrôle* : le mécanisme de contrôle a pour rôle de choisir, parmi les sources de connaissances dont la partie condition est vérifiée, celle dont la partie action sera exécutée, créant ainsi de nouvelles hypothèses dans le blackboard et permettant à la résolution de se poursuivre. L'aide au choix des SC à activer se fera par le biais d'« événements ». Ces événements sont engendrés par la création ou la mise à jour d'une hypothèse dans le blackboard. Ils sont placés dans une liste qui sera traitée par le mécanisme de contrôle.

#### 2.4.2.2 Communication par envoi de messages

Si les agents communiquent par envoi de messages ils se rapprochent du modèle d'*acteur* proposé par Hewitt [Hewitt, 77]. Ce premier modèle définissait un acteur comme une entité active et autonome qui a une vue partielle de l'univers. Cet acteur était décrit au moyen de deux éléments : des *accointances* (qui correspondent aux acteurs connus d'un autre acteur), et un *comportement* décrit par un *script*, ensemble de méthodes qui indiquent les différentes actions que peut accomplir cet acteur en réponse aux messages qu'il reçoit. L'acteur pourra adopter différents comportements pour répondre à un message : soit il le traite, soit il délègue la tâche à ses accointances ; il peut également créer de nouveaux acteurs puis disparaître. L'envoi de messages est le seul mode de communication entre acteurs. Tous les messages sont *asynchrones* et placés dans une mémoire-tampon (sans attente de réponse). Chaque message contient une *continuation*, à qui doit être retournée la réponse à la requête. Il y a *distribution des connaissances* (chaque acteur possède un comportement réparti entre ses accointances) et *distribution du contrôle* (chaque acteur possède un *script* qui définit sa réaction aux messages qu'il reçoit) [Ouzrout, 96].

#### 2.4.2.3 Protocoles de communication

Pour communiquer les agents doivent utiliser un protocole qui leur permet de structurer et d'assurer la continuité des communications et des échanges entre un début et une fin. La nature de ces échanges dépendant évidemment des capacités des agents à émettre des informations et à les traiter. Chacun émet des messages commençant par un mot clé de début et finissant de même, ces messages étant des ordres ou des informations, des requêtes, des promesses ou des menaces, etc.. Les réponses sont des messages porteurs d'informations ou d'actions.

L'expression du protocole se traduit par une succession d'étapes (représentées par un état) élémentaires de traitement local mise en œuvre au sein des agents, s'intercalant entre toute réception et émission d'interaction [Populaire & al., 93]. Les protocoles font appel à des principes psycho-cognitifs et sociaux. Ils s'appuient sur des mécanismes tels que les actes de langages ou mécanismes d'appels d'offres utilisés dans les établissements de contrats publics [Ferber & Erceau, 91].

Dans ce mémoire, nous n'allons nous intéresser qu'à la communication par envoi de messages. Pour ce type de communication, plusieurs protocoles sont possibles. Les décisions sur la façon dont les agents vont communiquer entre eux sont contraintes par la politique organisationnelle choisie ; plusieurs politiques sont proposées :

- communication sélective ou diffuse : les agents font-ils une distinction entre ceux avec qui ils vont communiquer et les autres ? si oui quels sont les critères pour choisir les destinataires ?
- communication non-sollicitée ou sur demande : sait-on qui veut communiquer avec qui ? la communication est-elle effectuée après demande d'informations ou après analyse des besoins informationnels des autres agents ?
- communication avec ou sans accusé de réception : le destinataire doit-il ou non indiquer à l'émetteur s'il a reçu l'information ?
- communication unique ou répétée: une information est-elle envoyée une ou plusieurs fois ? à quelle fréquence ?

### 2.4.3 Organisation des agents

*« Du point de vue de la réflexion sur la distribution des tâches et de l'interaction cohérente entre les agents dans la résolution de problèmes distribués ou dans un système multi-agents, le problème de base est une question d'organisation, à savoir, décider quel agent fera quoi et quand. » [Gasser, 88]*

Dans un premier temps, les travaux d'IAD se sont essentiellement rapportés aux théories de l'organisation. Ces travaux sont nombreux et variés<sup>33</sup>, de ce fait, ils sont assez difficiles à appréhender dans leur globalité. Ces travaux ont eu pour but de permettre la compréhension du fonctionnement des organisations et l'identification des moyens d'action sur l'organisation.

#### 2.4.3.1 Quelques définitions d'organisation

Crozier et Friedberg [Crozier & Friedberg, 77], définissent l'organisation comme un construit politique et culturel, un moyen dont les acteurs sociaux se dotent pour régler leurs interactions afin d'obtenir le minimum de coopération nécessaire pour atteindre des objectifs collectifs. Selon Malone [Malone, 87], l'organisation est une structure de coordination (de prise de décision) et de communication comprenant un ensemble d'acteurs afin de réaliser un but commun. Pour T. Bouron [Bouron, 92], l'organisation est définie comme l'ensemble des engagements tenus par les agents

<sup>33</sup> On peut citer les travaux de [ March & Simon, 58 ; Malone & Crowston, 90 ; Durfee & al., 87 ; Fox, 81 ; Pattison & al., 87 ; Bouron, 93 ; Ferber, 95 ]

constituant la société. L'organisation, pour M. Hannoun [Hannoun, 98] spécifie *qui* fait *quoi* et *comment*. Il base son modèle d'organisation sur les rôles et les liens organisationnels entre ces rôles, ce qui rejoint les travaux de M.S. Fox [Fox, 81], qui qualifie l'organisation de structure décrivant comment les membres sont en relation et interagissent afin d'atteindre un but commun. Henry Mintzberg [Mintzberg, 79] a donné une vue unifiée de quelques travaux ; il a défini la structure d'une organisation comme la somme totale des moyens employés pour diviser le travail en tâches distinctes et pour ensuite assurer la coordination nécessaire entre ces tâches

D'après les définitions issues des différentes disciplines (sociologie qui est une discipline fondatrice de ce concept, SMA, sciences humaines, sciences économiques), citées plus haut, nous constatons que le terme « organisation » est ambigu, il renvoie à la fois à l'action d'organiser et au résultat de cette action. Néanmoins, nous pouvons déduire que l'organisation est directement liée à la division de travail, répartition des rôles, des tâches et de responsabilités entre les membres d'un groupe.

Des études relativement récentes montrent [Huberman & al., 94] que dans les entreprises performantes coexistent deux types d'organisations :

- celle qui est *formelle*, dont l'objectif est de guider ses membres à une aptitude de collaboration ;
- celle qui est *informelle*, où la collaboration entre individus est faite de façon spontanée.

De façon analogue, nous pouvons trouver dans la littérature de l'IAD deux types d'approches pour la conception des organisations [Sichman, 95] :

- *l'approche statique* : selon cette approche, les liens d'autorité et de communication entre des agents, que l'on connaît tous a priori, sont complètement définis pendant la phase de conception du système. Ils servent à établir un moyen de contrôle global de la société, en la conduisant à un comportement censé résoudre un problème.
- *l'approche dynamique* : selon cette approche, les liens d'autorité et de communication ne sont pas pré-établis entre les agents. Ces liens sont créés de façon dynamique (que certains auteurs désigneraient par le terme « émergence »), lorsque les agents cherchent à atteindre leurs propres buts.

#### 2.4.3.2 Typologie des organisations

Suivant les rôles et les relations entre agents, différents types d'organisations ont été proposés par Gasser [Gasser, 92]:

*centralisée (hiérarchie uniforme)*, qui correspond au mode d'adaptation fixe, avec des liens de subordination de type maître/esclave. A chaque niveau, les maîtres centralisent les pouvoirs de prise de décision et de contrôle.

*de marché*, ce qui correspond aux organisations basées sur le principe de contrat. Les organisations de ce type sont formées d'agent indépendants qui résolvent leurs tâches individuelles en soumettant des sous-tâches aux autres. L'exemple de référence est le réseau contractuel (contract Net) de R.G. Smith [Smith, 80], qui repose sur un mécanisme d'allocation de tâches régi par le protocole d'appel d'offres qui est utilisé

dans les organisations humaines. Cette catégorie reflète la méthode qui existe dans l'univers économique réel.

*de communauté pluraliste*, qui correspond aux organisations variables émergentes. Les agents dans ce type d'organisation sont indépendants, ils préparent des solutions aux problèmes et communiquent leurs résultats aux autres membres de la communauté. On peut citer la communauté scientifique comme exemple de cette catégorie.

*de communauté à règles de comportements*, des organisations variables prédéfinies avec interactions selon des protocoles explicites. Les systèmes multi-experts et multi-sources de connaissances<sup>34</sup> appartiennent à cette catégorie.

Ces quatre types de structures sont basés sur des modèles d'organisations humaines. Les sociétés d'agents peuvent reposer sur une ou plusieurs de ces organisations, comme nous le verrons dans le chapitre IV.

Nous constatons qu'aucune définition unifiée n'a été donnée pour la notion d'organisation. A cet égard et dans l'état actuel de la recherche sur les organisations, rien ne nous permet de dire que tel ou tel modèle d'organisation est le mieux adapté à tel ou tel système. Ce que nous pouvons affirmer, c'est que la structure d'une organisation est fonction de l'environnement dans lequel elle évolue, des ressources (informations) disponibles pour atteindre le but commun, ainsi que de la nature de ce but.

Un des buts majeurs d'une société d'agents réside dans le fait que celle-ci peut tirer partie de la distribution pour résoudre les problèmes, c'est ce que nous allons voir dans le paragraphe suivant.

## 2.5 Distribution

« Tous les systèmes réels sont distribués ».

[Hayes-Roth, 80]

La distribution est un atout pour les SMA, elle permet de contrôler la complexité des problèmes à résoudre en décomposant par exemple le traitement. Elle peut être caractérisée comme un élément essentiel des systèmes évolutifs dans le sens où elle permet aussi le remplacement d'un système par plusieurs sous systèmes, ce qui conduit à une meilleure adaptation aux changements de l'environnement extérieur.

Parmi les aspects, proposés par A.H. Bond et L. Gasser [Bond & Gasser, 88], qui peuvent être distribués, nous citons : *l'autorité*, en effet différents agents peuvent avoir des niveaux d'autorité ou de responsabilité pour différents aspects d'une situation : *les ressources, le travail, l'information, ou la connaissance*.

Les raisons qui ont poussé les chercheurs à s'intéresser à la connaissance distribuée, et qui nous ont orientés à choisir une architecture distribuée (vue la problématique et le contexte industriel actuel, chap. I), sont multiples :

---

<sup>34</sup> Tels que HEARSAY [Erman, 80], GBB [Corkill, 86], et BB1 [Hayes-Roth, 88].

- les approches traditionnelles ont montré à travers le développement industriel des systèmes experts, que la conception de bases de connaissances suscite de nombreuses difficultés liées à l'importance de la taille des bases de connaissances, à la multiplicité des sources de connaissances et d'informations, à l'incohérence des bases de règles, et au raisonnement résultant de sources multiples, etc.
- une seule base de connaissance (centralisée) ne peut être une solution pour la représentation de raisonnement conflictuel.
- l'espace à explorer d'une base de connaissance est tellement grand qu'il en résulte une explosion combinatoire, d'où l'effondrement des performances du système.
- la faible résistance des systèmes, où la connaissance est centralisée, aux perturbations externes.
- dans la réalité, les hommes travaillent généralement (dans une entreprise) en groupe. Ils mettent en commun leurs expériences afin de collaborer pour atteindre un but. Il serait irréaliste de vouloir à tout prix représenter un système par un seul expert artificiel alors que la connaissance du système provient de plusieurs individus aux points de vue différents voire contradictoires.

Durfee, Lesser, Cornill [Durfee & al., 87], [Lesser & Cornill, 87] ont proposé plusieurs modes de distribution : *une distribution spatiale* qui concerne l'emplacement spatial des agents, de la connaissances, des processus, etc.. ; *une distribution fonctionnelle* qui détermine le rôle des agents au sein de la société ; *une distribution temporelle* qui s'explique par exemple dans le cas d'une expertise qui peut être disponible ou non à un moment donné ; *une distribution logique*, comme le précise P. Moraitis, concerne le degré d'indépendance logique entre les différentes parties de la connaissance disponible. Toutes ces notions sont en cohérence avec notre problématique et correspondent bien à notre contexte, elle vont être sous-jacentes au modèle de société que nous proposons dans le système MAC1 (chap. VI).

En résumé, une architecture distribuée facilite la modularité. L'extension du système est réalisée par l'ajout d'agents. La séparation des composants du système permet d'accroître la fiabilité de l'ensemble, de gérer les défaillances sans remettre en cause la construction globale. Il faut développer à la fois la distribution et l'intégration des compétences pour que les différences entre les agents autonomes accroissent les capacités du système.

### 3 CONNAISSANCE D'UN AGENT

« Celui qui sait qu'il ne sait pas, sait déjà beaucoup »

« Le premier acte de la connaissance, c'est sans doute la prise de conscience de ce que l'on connaît pas »

Aphorisme

#### 3.1 Généralités sur la connaissance en IA

Avant d'aborder la connaissance d'un agent, voici quelques généralités sur la connaissance en IA (acquisition et représentation).



Dès les années soixante-dix, un intérêt particulier est porté au concept de *connaissance*. S'il y a des notions difficiles à définir, la connaissance en est une ; elle est définie (en IA) comme l'ensemble des informations (savoir, savoir-faire, expérience, souvenir, concepts, faits..), nécessaires à un être humain (ou à une machine) organisées de manière à ce qu'il puisse accomplir une tâche considérée comme complexe.

Les connaissances utilisées en IA ont une sémantique principalement symbolique, et c'est à ce type de connaissance que nous nous intéressons. Il est convenu que lors de la mise en œuvre d'un système à base de connaissances [Kayser, 84] :

*Les deux facettes complémentaires de l'effort à mener sont la représentation des connaissances a priori et l'utilisation de ces connaissances a posteriori.*

Quelques questions sur le sujet ont été alors posées [Sleeman, 92], [Napoli, 92], [Brachman, 90], [Laurière, 88], [Kayser, 84] :

- Comment acquérir les connaissances d'un expert ?
- Sous quelle forme doivent s'exprimer ces connaissances ?
- Comment représenter ces connaissances dans un système ?
- Quel et comment un algorithme ou un mécanisme de raisonnement peut-il exploiter un ensemble de connaissances forcément limité, et comment peut-il tirer de cet ensemble toutes les informations implicites qu'il renferme ?

Tout au long de ce mémoire, nous essayerons de répondre à quelques unes des questions citées ci-dessus.

### 3.1.1 Acquisition de la connaissance

Pour résoudre des problèmes dans un domaine précis, l'être humain doit tout d'abord avoir une connaissance du domaine en question. Cette connaissance permet d'orienter le raisonnement vers le but à atteindre. De ce fait, si on veut faire résoudre des problèmes par des machines automatiques, il faut les doter de connaissances nécessaires à la résolution. Ces connaissances seront obtenues par le biais d'un processus appelé « acquisition de connaissances » qui consiste à transférer des connaissances depuis les sources d'expertises (experts, documents, bases de données, etc..) vers le système automatique.

L'expertise détenue par les experts représente la connaissance la plus difficile à extraire et à modéliser dans un Système à Base de Connaissances (SBC). En effet, cette expertise est acquise par une longue pratique (expérience), et puisque l'expert n'a pas un accès conscient à ses connaissances, leur explicitation par celui-ci n'est pas évidente et leur acquisition représente donc une tâche délicate.

Un autre problème auquel sont confrontés les développeurs des SBC est celui de l'oubli de la part des experts de délivrer une partie de leurs connaissances. Cela est dû au fait que l'expert ne se met pas toujours en situation réelle lorsqu'il fournit ses connaissances, par conséquent il ne décompose pas explicitement toutes les étapes du raisonnement pour fournir la totalité de son savoir à propos de la tâche qu'il traite.

La confrontation à ces problèmes a donné naissance à des méthodologies<sup>35</sup> d'acquisition de connaissances qui ont pour objectif de faciliter le transfert de connaissances depuis des experts humains vers des systèmes informatiques, parmi les plus avancées et populaires nous pouvons citer MACAO [Aussenac, 89], KADS<sup>36</sup> [Brenker, 85 ; Krisch, 93], KOD<sup>37</sup> [Vogel, 88]. Ces méthodes ont comme principe la séparation des phases d'analyse et de conception pour aboutir à la construction d'un modèle de connaissances fiable.

### 3.1.2 Représentation de la connaissance

La connaissance, manipulée au sein d'un agent et d'un SBC, est considérée comme une unité calculable, une entité ontologique des taxonomies d'objets et des relations qui les relient. Elle peut être un fait, une donnée brute ou une action caractérisant les objets du domaine d'application ou leur comportement.

Pour un SBC, la création, la maintenance, la réutilisation des bases de connaissances, l'acquisition des connaissances et l'apprentissage sont très dépendants de la représentation des connaissances qui consiste à transcrire des connaissances sous une forme symbolique exploitable par un système de raisonnement.

Le mode de représentation qui nous intéresse (par rapport à notre domaine d'application, chap. I) est de nature déclaratif, car il permet une formalisation des connaissances, à la fois explicite et directement accessible, indépendante de la structure de contrôle. Ainsi,

***Représenter = Stocker + Raisonner*** [Napoli, 92].

*La bonne connaissance suppose l'utilisation à bon escient des informations dont on dispose... Le problème est de trouver des structures informatiques permettant le stockage et l'utilisation par la machine elle-même de ces informations... [Kayser, 84].*

*The knowledge needed to get along the world could be written down in some form and then used as needed [Brachman, 90].*

De ces points de vue une définition plus générale de la représentation des connaissances peut être dégagée :

La représentation des connaissances, dans n'importe quel système informatique, consiste a priori en l'élaboration des formalismes et des structures de données appropriées au stockage et à la manipulation des connaissances, et a posteriori en l'implémentation des programmes capables de mieux exploiter l'ensemble (forcement limité) de ces connaissances.

---

<sup>35</sup> Boose, 86 ; Eshelman, 86 ; Vogel, 88 ; Aussenac, 89 ; Dieng, 90 ; Brunet, 91 ; Vicat, 93.

<sup>36</sup> Knowledge Acquisition and Design Support, développée dans le cadre d'un projet ESPRIT (n° 1098)

<sup>37</sup> Knowledge Oriented Design

La représentation des connaissances consistait à ses débuts en la mise en œuvre de formalismes relativement simples (exemple : objet-attribut-valeur de SNARK [Laurière, 86] et objet typé sous forme d'une liste d'attribut-valeurs d'OPS [Forgy, 81] et ses dérivés). Cette façon de faire n'arrivait pas à répondre d'une manière satisfaisante aux besoins rigoureux des applications qui nécessitaient l'emploi et la manipulation des objets complexes. En effet, dans de nombreux cas, la solution à un problème complexe fait appel à divers types de raisonnement et par conséquent nécessite une représentation hétérogène afin de modéliser convenablement chaque type de connaissances.

Depuis, la représentation des connaissances a largement dépassé le statut d'activité secondaire de l'IA, pour devenir un domaine de recherche à part entière [Brachman, 90]. Au long de sa maturité, elle a connu des changements de méthodologies, et de développement de nouvelles techniques ainsi que d'importantes contributions des autres disciplines comme les mathématiques (en particulier les logiques), la psychologie, l'informatique (notamment les bases et les banques de données), les langages à objets... [Kayser, 84, 85]. Notre intérêt porte tout particulièrement sur la représentation des connaissances par règles et par objets, pour les raisons que nous allons voir dans les paragraphes suivants.

Le retentissement de l'Approche Orientée Objet (AOO) dans les activités liées à la représentation des connaissances découle du fait qu'une représentation par objets répond le mieux aux objectifs de spécifications. Elle permet d'appréhender d'une manière efficace et naturelle un concept (entité, action ou état) qui existe dans un univers, d'un point de vue conceptuel (structurel). Les concepts sont définis comme des collections de propriétés structurelles et procédurales décrivant leur état et les opérations qu'ils sont capables d'exécuter pour communiquer entre eux. De tels langages sont aussi qualifiés de langages de représentation hiérarchique du fait qu'ils organisent les concepts en niveaux d'abstraction par l'intermédiaire du *mécanisme d'héritage*<sup>38</sup>. Les formalismes habituellement employés pour représenter des hiérarchies de concepts sont les *classes* (*d'objets*) et les *frames*.

La représentation des connaissances et la programmation par objets ont pris corps dans les années 70 à partir de travaux comme ceux de Minsky<sup>39</sup>. Depuis, le paradigme objet a eu un succès remarquable et a été impliqué dans beaucoup d'activités de recherches et en particulier les bases de données [Gardarin, 93] et les SBC [Pachet, 92, Masini et al., 89]. L'intérêt de l'activité de la représentation des connaissances pour l'AOO s'est développé durant la dernière décennie, quand cette activité a exprimé des besoins de spécification et de modélisation difficilement réalisables avec les outils de l'informatique classique. Elle s'appuie sur des atouts puissants concernant la pluralité des niveaux d'abstraction, la réutilisation, la facilité de passage du modèle conceptuel à l'implémentation etc. [Debenham, 94, Unland & Schlageter, 92, Mylopoulos, 91, Ferber, 85].

<sup>38</sup> ou de subsumption. Dans le cadre de ce projet, on s'intéresse uniquement à l'héritage.

<sup>39</sup> M. Minsky a introduit la notion de *frame*, proche de celle de *classe d'objets*, en travaillant sur les rapports entre perception et mémoire. "Here is the essence of the theory : "When one encounters a new situation (or makes a substantial change in one's view of the present problem), one selects from memory a substantial structure called a frame. This is a remembered framework to be adapted to fit reality by changing details as necessary." [Minsky, 75], extrait de [Masini et al., 89] p 275.

La conception orientée objet permet la spécification des structures et comportements concernant un objet à la fois, alors que le formalisme règles de production qui manque d'outils structurels, permet la manipulation d'ensembles d'objets, chose difficilement faisable avec la programmation orientée objet seule. Aussi, le formalisme règles de production est incapable tout seul, d'accueillir d'autres formes de comportement de la connaissance que les associations condition-action. L'AOO apporte un complément au paradigme règle de production, permettant d'exprimer toute forme de dynamique qu'une connaissance pourrait avoir. Le paradigme objet est considéré alors comme l'unité logico-sémantique de la connaissance [Laurière, 88].

## 3.2 Formalisation de la connaissance d'un agent

### 3.2.1 Introduction

Depuis longtemps, l'homme a eu l'idée de faire résoudre des problèmes par des machines automatiques. De la mise en pratique de cette idée, il s'est avéré que cela n'est vraiment possible qu'en dotant ces dites « machines » de connaissances utilisées par les humains lorsqu'ils accomplissent des tâches données. Désormais tout développeur ou utilisateur d'un système intelligent sait que la capacité du système à résoudre des problèmes et à fournir des explications dépend des connaissances qu'il exploite : les concepts, les relations, les représentations, les méthodes et les heuristiques portant sur son domaine de travail.

L'agent cognitif dispose de connaissances explicites qu'il peut utiliser pour appréhender le monde, surmonter des difficultés, établir des jugements, résoudre des problèmes, prendre des engagements, c'est à dire assurer sa propre autonomie [Haurat, 95]. Son comportement est fondé sur des connaissances données a priori ou des connaissances révisés par apprentissage (Cf. chap. III, V).

La connaissance d'agent ne se limite pas à celle des tâches qu'il accomplit, il faut aussi inclure les informations concernant le monde qui l'entoure, c'est-à-dire son environnement et les autres agents avec lesquels il communique et interagit. La connaissance dans *l'interaction* est le fruit d'interactions entre agents cognitifs [Ferber, 95].

Il existe une approche, qui représente ce qu'on appelle l'hypothèse kénétique ou interactionniste [Ferber, 95], qui postule que la connaissance d'un individu peut être considérée comme un système multi-agent à part entière, les concepts, notions et représentations étant alors des agents de nature particulière qui « vivent » à l'intérieur des agents. Le raisonnement d'un agent peut alors être vu comme la résultante des interactions noétiques<sup>40</sup> [Morin, 91] à la manière dont Minsky le suggère dans sa société de l'esprit [Minsky, 88].

Cette approche nous semble pertinente (en perspective) car elle pourrait apporter des résultats intéressants quand à la compréhension de l'élaboration de la connaissance dans les systèmes multi-agents.

---

<sup>40</sup> Phil. Relatif à la noèse. Noèse : acte par lequel la pensée vise un objectif pour la phénoménologie.

En général, les agents cognitifs disposent de trois types de connaissances [Iffenecker, 92] :

1. **connaissances du domaine**, c'est l'expertise sur un domaine précis (Cf. §. 3.3).
2. **connaissances de communication**, pour réaliser un projet et atteindre les objectifs, les agents coopèrent et interagissent en s'échangeant des informations ou des problèmes. Les connaissances de communication leur servent alors à progresser dans la réalisation de ce projet (cf. chap. IV).
3. **connaissances de contrôle**, permettent aux agents de coordonner leurs actions, et de décider des tâches à accomplir en vue de réaliser un projet commun.

### 3.2.2 Quelques caractéristiques d'un agent

Dans ce paragraphe, nous présentons quelques aspects qui caractérisent un agent cognitif, tels que l'intention, la rationalité, la croyance, l'engagement. La liste est loin d'être exhaustive, mais nous n'avons retenu que ceux qui nous intéressent.

#### 3.2.2.1 Intention

L'intention<sup>41</sup> est un élément crucial du comportement intelligent d'un agent, c'est la déclaration explicite des objectifs individuels. Elle exprime donc la volonté consciente d'un agent d'atteindre un but ou d'effectuer un acte. Les intentions sont modélisées par un état mental complexe repris des travaux de Cohen et Levesque [Cohen & Levesque, 88 ; 90]. Selon ces auteurs, les intentions doivent satisfaire deux contraintes : des contraintes temporelles, et des contraintes sur des buts :

Des contraintes temporelles sous-jacentes à la notion d'intention supposent que des intentions émises par un agent prennent en compte des croyances dans le passé et un désir final à réaliser dans le futur.

Des contraintes sur des buts supposent une relation d'ordre concernant les intentions. Plus précisément, un désir est réalisé en un ensemble d'intentions complexes définies par des buts à satisfaire. Les buts sont alors décomposés en sous-buts jusqu'à l'obtention de sous-buts élémentaires.

#### 3.2.2.2 Concept de Rationalité

Du point de vue de l'IA<sup>42</sup>, et comme l'indique Newell [Newell, 82], le principe de rationalité consiste à faire en sorte que « si un agent sait que l'une de ses actions lui permet d'atteindre ses buts, alors il sélectionnera cette action ». Les agents rationnels disposent de critères d'évaluation de leurs actions, et sélectionnent selon ces

<sup>41</sup> Notons que chez Minsky la notion d'intentionnalité n'existe pas, elle est remplacée par la notion d'objectif.

<sup>42</sup> On a déjà vu la notion de rationalités du point de vue de l'économie au chapitre I.

critères les meilleures actions qui leurs permettent de prendre la meilleure décision. De tels agents sont capables de justifier leurs décisions.

### **3.2.2.3 Croyances**

En général, les croyances décrivent l'état du monde du point de vue d'un agent, et donc la manière dont il se représente son environnement, les autres agents ainsi que lui même. Notons que toute information qui fait l'objet d'une croyance peut être remise en question, ce type de connaissance n'est pas objectif. Chaib-Draa [Chaib-Draa, 89] lui donne le sens d'une information pertinente pour l'agent.

### **3.2.2.4 Engagements**

L'engagement (commitment) se présente comme l'un des concepts clés de l'action collective dans le cas de SMA cognitifs. Ce concept a été introduit en IA [Fikes, 82], et analysé en détail par Alan Bond [Bond, 89 ; 90], [Rao & Georgeff, 92], [Cohen & Levesque, 87 ; 90].

Pour Jacques Ferber, les engagements caractérisent les dépendances (devoirs, contraintes...) qui lient les agents cognitifs par rapport à eux-mêmes, mais surtout par rapport aux autres lorsqu'ils décident d'accomplir une action, de rendre un service et, d'une manière générale, lorsqu'ils ont l'intention de faire quelque chose. Si les agents ne prenaient pas d'engagements, il leur serait impossible d'avoir une représentation adéquate d'un état futur du monde et donc de planifier leurs propres actions en anticipant sur l'avenir.

Ce concept d'engagement semble voué à désigner les liens unissant les membres d'une organisation, et à constituer une transition entre l'organisation et la communication.

On peut distinguer plusieurs cas de figure [Ferber, 95] selon que les engagements portent sur la réalisation d'une action (je m'engage à vous payer), sur l'affirmation d'une croyance (je vous assure que c'est vrai), sur la réalisation d'un but (j'ai bien l'intention d'augmenter le chiffre d'affaire), sur des conventions sociales (je m'engage à accepter les règlements intérieurs de cette firme), ou sur un rôle social (je m'engage à faire tout ce qui est en mon pouvoir en tant que premier ministre).

***Engagements relationnels*** : un agent s'engage envers autrui soit à accomplir une action (ou essayer de satisfaire un but), soit sur la validité d'une information.

***Engagements environnementaux***: il s'agit de l'engagement envers les ressources.

***Engagements envers le groupe social*** : il existe deux formes d'engagement liées au groupe social. La première consiste à promettre d'accomplir une tâche pour le groupe ou l'organisation (semblable à l'engagement relationnel, seulement l'engagement se rapporte à un groupe et non plus à un agent). La deuxième forme porte sur l'engagement envers des conventions sociales et sur l'acceptation des contraintes associées à un rôle dans une organisation.

**Engagement des organisations envers ses membres** : une entreprise, par exemple, s'engage effectivement à payer ses salariés. Il s'agit donc d'un type d'engagement inverse du type précédent puisque c'est le groupe qui s'engage envers ses membres.

**Engagements envers soi-même** : un agent peut s'engager envers lui-même à accomplir une action.

### 3.3 Connaissance dans les organisations productives

#### 3.3.1 Catégorisation des connaissances dans une entreprise

Depuis les travaux de Rasmussen [Rasmussen, 85], [Rasmussen, 86], et Lind [Lind, 85], la psychologie cognitive fait référence à une hiérarchisation des connaissances de l'expert en trois niveaux. Le niveau auquel ce dernier se place dépend de son mode de fonctionnement [Falzon, 88], [Hoc, 87].

En s'appuyant sur leurs travaux, le concept de connaissance peut être décliné en trois catégories auxquelles seront ensuite associées des activités cognitives de différents niveaux. Ainsi,

- les connaissances *routinières*, très familières pour l'expert, se manifestent par des actions automatiques, et sont obtenues par la répétition d'une série de situations correspondant à des conditions extrêmement proches, en environnement stable,
- les connaissances *opératives* sont finalisées et spécifiques du domaine, proviennent de la pratique répétée de tâches ou d'expériences analogues sans être exactement identiques, dans un environnement instable,
- les connaissances *générales* de haut niveau sont utilisées dans le cadre de situations nouvelles ou exceptionnelles, que le sujet ne sait pas traiter a priori. Ces connaissances font appel à des références de logique et de bon sens, et sont exemptes de contraintes de finalité.

Ces trois classes renvoient ensuite à des niveaux d'activités différents : les connaissances routinières et les connaissances opératives sont utilisées pour l'exécution de procédures prédéfinies de résolution de problèmes. Ce type d'activités n'est pas ou peu créatif, dans la mesure où il correspond à la répétition de situations passées identiques ou analogues.

En revanche, les connaissances générales de haut niveau seront utilisées lors de processus de recherches de solutions nouvelles à un problème posé, et mises en oeuvre dans des démarches créatives de formulation de problème [Burlat, 96].

### 3.3.2 Connaissance collective dans une entreprise

La connaissance collective<sup>43</sup> est plus que la simple addition des connaissances individuelles [Bruneau & Pujos, 92]. Elle représente un ensemble coordonné de savoirs, pratiques et comportements tendant à la fois à faire vivre l'entreprise et à lui permettre d'assurer son identité propre.

La connaissance d'une entreprise, et plus généralement d'un système, comprend trois éléments (Fig II. 4) :

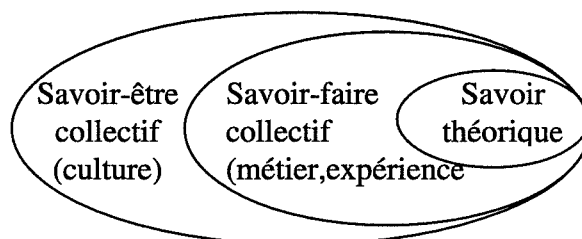


Figure II. 4 : Connaissance d'une entreprise

- le *savoir théorique collectif* : types d'informations disponibles et recherchées, jargon technique..
- le *savoir-faire collectif* : ensemble des métiers de l'entreprise, des méthodes de travail..
- le *savoir-être collectif* : identité de l'entreprise (logo, objectifs, projets, valeurs, histoire), manière de traiter les clients, rituels des réunions..

C'est l'interrelation permanente entre ces éléments qui constitue la connaissance collective, composante vivante de l'entreprise, qui n'est pas visible et difficilement palpable.

Cela rejoint les travaux de Carl Hewitt qui décrivent un type d'organisation, « Open Information System », dans lequel la connaissance n'est pas la somme des connaissances de tous les acteurs du système, mais la résultante de l'interaction de plusieurs micro-théories, c'est-à-dire de savoir et de savoir-faire associés à des acteurs.

Cette classification de connaissance nous paraît intéressante, car elle peut mettre en avant les problèmes d'incertitude et d'incomplétude. Par exemple, le recours à des consultants ayant une expérience inter-entreprises peut être une façon d'enrichir le spectre des connaissances, propre à l'entreprise, défini à travers ses acteurs et leurs interactions.

---

<sup>25</sup> Par connaissance collective (pour une entreprise) nous entendons l'ensemble des savoirs théoriques, savoir-être et savoir-faire qui permettent à l'entreprise de faire face aux exigences de son environnement et forment la connaissance de l'entreprise.



## **4 APPORTS MUTUELS**

### **4.1 Apports des organisations productives aux SMA**

Les travaux sociologiques sur les organisations tels que les modèles développés sur les organisations humaines évoqués dans Kornfeld et Hemitt [Kornfeld et al., 81], [(de) Terssac & Lompré, 94], [Lachaud & al., 94] intéressent la communauté IAD-SMA.

Les organisations productives mettent en avant la complexité des phénomènes de prise de décision, ce qui permettra aux SMA d'enrichir leurs travaux sur la communication, les protocoles de négociations et la résolution de conflits ainsi que l'émergence de comportements.

Le domaine des organisations productives et plus particulièrement de la prise de décision est un domaine privilégié d'application de l'IAD mais surtout un domaine d'apport exceptionnel proposant une pléiade de concepts nécessaires au renforcement de la panoplie conceptuelle de l'IAD.

### **4.2 Apports de l'approche SMA aux organisations productives**

Dans les systèmes multi-agents, les problématiques soulevées sont : la distribution des problèmes à traiter, la répartition de la connaissance sur un certain nombre d'entités distribuées et coopérantes, la coordination des comportements des entités selon des lois sociales, et l'émergence de concepts nouveaux à partir d'un caractère collectif d'entités individuelles et autonomes. Ces problématiques rejoignent clairement les problèmes de coordination, de coopération au sein des organisations productives, le partage de la connaissance en entreprise, ainsi que la question de la gestion des conflits, du comportement social au sein d'un groupe, et du maintien de la cohérence des décisions et des plans d'actions entre le local et le global. L'étude de l'émergence de nouveaux concepts dans les SMA fait référence à la possibilité d'apparition de fonctionnalités globales qui n'ont pas été explicitement programmées au niveau des entités, et qui résultent des interactions entre deux ou plusieurs composants dans les organisations productives.

Cette notion d'interaction est analysée par J. Ferber comme point de départ de ce qu'il désigne par kénétique, à la fois la science et la technique des organisations artificielles, qui met en avant les interactions locales et les phénomènes d'émergence qui en résultent. Cette démarche dépasse l'approche systémique classique de L. Le Moigne et de P. Delattre. D'après Ferber, la kénétique rejoint le courant de E. Morin, F. Varela, H. Atlan, ou E. Bernard-Weil, qui consiste à comprendre les systèmes, comme des entités auto-organisatrices, dont le fonctionnement et l'évolution sont les produits du comportement d'un ensemble d'entités en interactions.

En résumé, une telle approche est souhaitable pour résoudre des problèmes qui sont complexes, dont la résolution utilise des connaissances de différents domaines, et parfois nécessite un traitement géographiquement distribué. Cette approche permet de

réduire et de contrôler la complexité, l'amélioration de la réponse dégradée, le support à l'évolution.

Dans les SMA : du point de vue conception du système, les agents , les organisations et les interactions sont conçues indépendamment d'un problème particulier devant être résolu. Il devient donc possible de réutiliser ces composantes pour concevoir des applications similaires. Les agents, dynamiquement, vont instancier les organisations et les interactions lorsqu'un problème est proposé au système.

## 5 DISCUSSION

Une organisation productive est un système complexe disposant d'une structure (organisation) qui assure la division et la coordination des tâches en vue d'atteindre certains objectifs. C'est un système naturellement distribué, sa compétence et son savoir faire ne sont pas centralisés ni détenus par une entité unique. Chaque entité possède une connaissance parcellaire de l'ensemble des problèmes. La réalisation d'un même objectif global de cette organisation, implique toutes les entités autonomes, et repose sur leurs interactions, et leurs coopérations. Selon T. Schael [Schael, 97], les être humains ont besoin de coopérer afin de réaliser ce que l'on attend d'eux. De plus le travail est vu comme étant toujours socialement organisé. Les travailleurs coopératifs doivent articuler (diviser, allouer, coordonner, planifier, mélanger, relier, etc..) leurs activités individuelles distribuées.

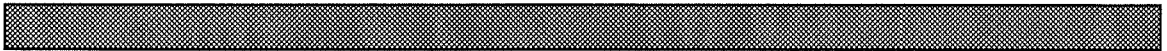
L'approche multi-agents semble apporter une voie nouvelle intéressante pour la modélisation des organisations productives. Elle permet de formaliser à la fois l'organisation et les entités autonomes qui la composent. Par son caractère méta-systémique et par l'importance qu'elle accorde à l'autonomie des entités constituantes, elle permet d'apporter des abstractions intéressantes et utiles pour la description, l'analyse et la conception de comportements de systèmes complexes telle une société humaine. Ainsi les SMA montrent bien leur adéquation à la modélisation des phénomènes décisionnels dans les organisations productives.

En s'appuyant sur ces concepts, nous allons construire dans le chapitre IV un Modèle d'Agents Cognitifs : MAC1, qui formalise clairement les entités décisionnelles dans l'organisation, leurs connaissances, leurs interactions, leurs coopérations, etc..



## CHAPITRE III

### APPRENTISSAGE EN IA, IAD, ET ORGANISATIONS PRODUCTIVES



*La faculté d'apprentissage est nécessaire à tout système intelligent. Elle est étudiée dans le but d'améliorer le fonctionnement du système en lui permettant d'évoluer. Dans cette optique là, nous allons définir, dans ce chapitre, l'apprentissage suivant deux approches : à savoir l'approche d'Intelligence Artificielle (IA), CBR / Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) et la vision économique de l'apprentissage.*



## 1 INTRODUCTION

*« Ainsi, la question de dire si un système est de l'IA ou non n'est pas tant qu'il modèle ou non une intelligence humaine, mais qu'une intelligence humaine puisse comprendre son comportement en termes de concepts clairement définis. »*

Y. Kodratoff, 1986 (Leçons d'apprentissage automatique)

Définir l'apprentissage, en général, est une tâche aussi difficile que définir l'intelligence. Selon une première définition issue de la psychologie scientifique, et qui correspond à une acceptation plus générale que l'usage commun, l'apprentissage recouvre « toute modification stable des comportements ou des activités psychologiques attribuable à l'expérience du sujet »<sup>44</sup>. H. Simon propose de décrire l'apprentissage comme « les changements d'un système lui permettant de refaire la même tâche ou une tâche tirée de la même population mieux et plus efficacement la fois suivante ». Cette définition se limite à l'apprentissage de comportement, et exclut l'acquisition de nouvelles connaissances [Cornuéjol & al., 95]. En outre, il n'est pas fait mention de la durée ni de la portée des modifications : temporaires ou définitives, à court ou à long terme, etc.

Il est dès lors plus judicieux d'examiner l'apprentissage à la fois à travers les différents points de vue des disciplines qui nous intéressent (IA, IAD, organisation productive), et sous les différents mécanismes impliqués.

Dans les organisations productives, l'apprentissage est le fruit de la répétition et de l'expérimentation, c'est un processus actif et permanent liant les compétences internes de la firme et l'état de son environnement.

Pour ce qui est de l'intelligence artificielle, l'apprentissage est considéré soit comme un processus centralisé, soit comme un processus distribué. Dans ce dernier cas l'intérêt portera sur l'interaction entre le groupe et l'agent.

A travers ce chapitre, nous allons dresser un panorama succinct des recherches<sup>45</sup> dans le domaine de l'apprentissage suivant une certaine logique, partant de l'apprentissage individuel jusqu'au collectif. Ensuite, nous traiterons la question de l'apprentissage dans le domaine des organisations productives.

## 2 APPRENTISSAGE EN INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA)

L'apprentissage<sup>46</sup> en intelligence artificielle comme l'apprentissage humain est un processus qui consiste à acquérir de nouvelles connaissances ou à améliorer celles déjà acquises. Le système améliore ses connaissances et son comportement au fur et à mesure qu'il apprend.

---

<sup>44</sup> J.F Le NY : Encyclopédia Universalis, 1968, p. 173.

<sup>45</sup> Nous ne cherchons en aucun cas à les présenter d'une manière exhaustive.

<sup>46</sup> Dit « automatique ».

Les méthodes d'apprentissage en IA peuvent être divisées en deux classes, à savoir « l'approche numérique » et « l'approche symbolique » ([Carbonell & al., 84], [Kodratoff, 86, 91], [Michalski, 86]). Nous allons nous focaliser sur l'apprentissage symbolique qui traite un ensemble d'énoncés décrits dans une représentation symbolique. Cette approche est très sensible au bruit mais les résultats sont plus facilement compréhensibles grâce à la sémantique intégrée dans la représentation des objets.

En IA, cette approche de l'apprentissage opère une dichotomie. Elle est identifiée sous des vocables de la logique mathématique : déduction et induction<sup>47</sup>. C'est sur cet axe (du déductif à l'inductif) que l'on peut classer quelques techniques d'apprentissage.

## 2.1 Apprentissage par coeur et apprentissage par instruction

Ce sont des apprentissages purement *déductifs*<sup>48</sup>. En apprentissage par coeur la connaissance est acceptée et mémorisée par le système telle qu'elle est fournie par l'environnement. En apprentissage par instruction, le système doit reformuler la connaissance qui lui est fournie dans le langage du système.

## 2.2 Apprentissage à partir d'observations / à partir d'exemples

Il s'agit là d'apprentissages purement *inductifs*<sup>49</sup>. ([Dietterich, 84], [Kodratoff, 86], [Fisher, 87]). Ils consistent à établir une classification à partir d'un ensemble de situations données de manière à mettre en évidence des structures et des concepts n'apparaissant pas *a priori*.

## 2.3 Apprentissage et raisonnement par analogie<sup>50</sup>

### 2.3.1 Formalisation du paradigme analogique

Au sens propre, l'*analogie* représente l'identité du rapport qui unit deux à deux les termes de deux ou plusieurs couples [Lalande, 88]. Elle est le processus mathématique de proportionnalité. Par définition, elle désigne « rapport, similitude partielle d'une chose avec une autre ».

---

<sup>47</sup> Nous sommes conscients que c'est réducteur.

<sup>48</sup> La déduction est un processus d'inférence qui permet de conclure de nouvelles propositions spécifiques à partir d'un ensemble de propositions générales, par application d'un ensemble de règles logiques.

<sup>49</sup> L'induction est un processus de dérivation de propositions plus générales à partir de propositions établies pour certains cas spécifiques, par application d'un ensemble de règles logiques.

<sup>50</sup> L'analogie est un processus de dérivation de propositions caractérisant une situation inconnue à partir de propositions caractérisant une situation connue et similaire. Une situation peut se référer à un objet, une classe d'objet, un problème, une règle ou procédure de résolution, une action, un plan, un comportement, etc.; une similarité peut porter sur des attributs physiques ou structurels, des liens conceptuels, des historiques de résolution, etc..

Les deux composantes essentielles de l'analogie sont la mise en évidence des caractéristiques ou propriétés communes des situations et la détermination des relations intra- ou inter-domaines [Rougegrez-Loriette, 94].

Plus formellement, soit deux univers de connaissances :  $U$  totalement connu et  $U'$  partiellement connu, et deux problèmes  $D$  et  $D'$ ,  $D$  appartenant à l'univers  $U$  et  $D'$  à  $U'$ .  $D$ , supposé résolu, est appelé le problème source du raisonnement alors que  $D'$ , qui est le problème à résoudre, est appelé le problème cible.

Supposons que  $D$  possède des propriétés prémisses  $P_i(D)$  connues et des propriétés conclusions  $C_i(D)$  connues telles que les  $P_i(D)$  impliquent les  $C_i(D)$ . Supposons également que  $D'$  possède des propriétés  $P_i(D')$  telles que les  $P_i(D)$  soient identiques, à une unification près, aux  $P_i(D')$ . Alors on déduit logiquement, par modus ponens [Davies, 87], que  $D'$  possède les propriétés  $C_i(D')$  [Bichindaritz, & al., 91].

Cependant, cette formalisation logique est rarement utilisable du fait que les données sont incomplètes, imprécises et/ou incertaines. Les égalités s'affaiblissent et sont remplacées par des relations de **correspondance** (ou structure mapping [Gentner, 83]) et les implications logiques prennent le sens de relations de **dépendance** [Coulon, 90] (cf. fig. III. 1).

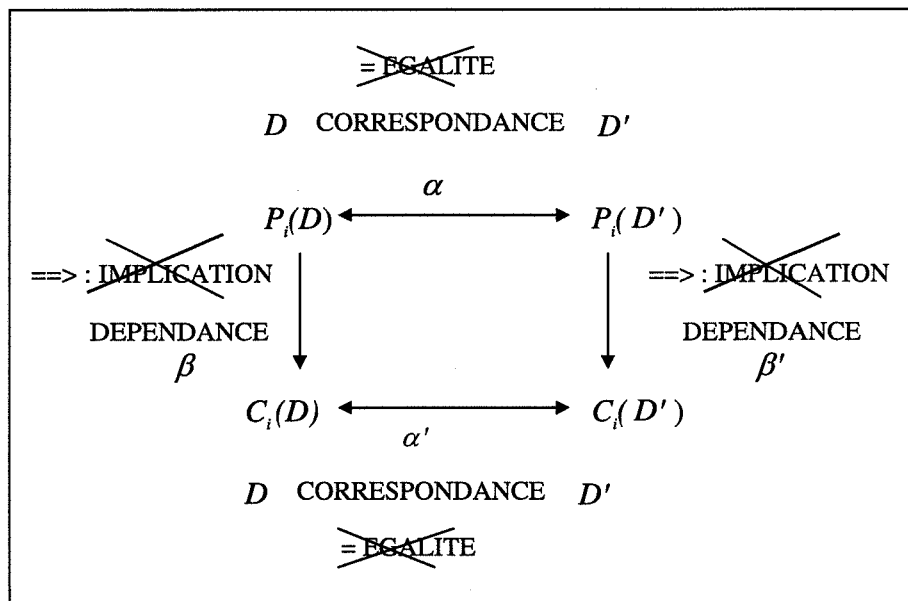


Figure III. 1 : Concepts descriptifs du paradigme analogique



### 2.3.2 Apprentissage par analogie

C'est un apprentissage [Carbonell, 83], [Carbonell, 86] à la fois déductif et inductif. Il consiste à reconnaître des similarités entre le concept à apprendre et un concept connu, et à déterminer quelles caractéristiques pertinentes peuvent être transférées du concept connu vers le concept à apprendre. En d'autres termes, ce type d'apprentissage consiste à reconnaître un problème déjà résolu et à exploiter la solution pour résoudre un nouveau problème.

L'être humain l'utilise à des fins variées, pour guider un raisonnement ou la résolution d'un problème, émettre des hypothèses sur un domaine peu familier ou encore généraliser l'expérience acquise. De ce fait l'analogie est un objet d'étude privilégié tant pour les sciences cognitives, qui s'efforcent d'en clarifier les mécanismes dans l'espoir de mieux comprendre les processus humains de raisonnement et d'apprentissage, que pour l'IA qui cherche à émuler ce mode de raisonnement de façon à améliorer les performances des systèmes à base de connaissances.

### 2.3.3 Du raisonnement par analogie au raisonnement à partir de cas

Le raisonnement par analogie est reconnu être très utilisé par l'être humain. Dans la vie quotidienne, face à une situation donnée, l'expérience d'une situation semblable peut se révéler très utile.

Nous rappelons que le raisonnement par analogie a pour objectif l'inférence d'informations sur une situation (la cible) à partir de la description d'une situation dans laquelle ces informations sont connues (la source). M-D. Gineste et B. Indurkha définissent l'analogie comme une stratégie cognitive mise en œuvre au moment du traitement d'informations ou de situation nécessitant la mobilisation de connaissances antérieures [Gineste et Indurkha, 93]. De nombreux exemples d'analogie existent dans notre entourage : l'analogie atome/système solaire, l'analogie courant électrique/cours d'eau, etc..

Le raisonnement à partir de cas est considéré par plusieurs auteurs comme un raisonnement par analogie dont la source et la cible appartiennent à un même domaine de connaissances [Kolodner & Simpson, 89], le terme de raisonnement par analogie étant réservé à un raisonnement inter-domaines. Parfois ces termes sont présentés comme équivalents [Kolodner, 91a].

Le **raisonnement à partir de cas**<sup>51</sup> a pour origine la psychologie cognitive pour l'étude de la mémoire et le raisonnement par analogie. Ainsi, il peut être vu comme une spécialisation du raisonnement analogique sur un domaine d'inférence limité et pour lequel le domaine de la source et de l'objectif coïncident. Le raisonnement à partir de cas complète le raisonnement par analogie par un mécanisme de mémorisation et d'extraction des expériences et d'apprentissage [Rougegrez-Loriette, 94], [Napoli, 94].

---

<sup>51</sup> Qu'on détaillera au paragraphe 3. Situer le raisonnement à partir de cas dans cette classification (induction et déduction) n'est pas facile, car une théorie de l'apprentissage intégrant le raisonnement à partir de cas doit être une théorie de l'apprentissage suivant la mémoire : Apprentissage = inférence + mémoire.

Le raisonnement à partir de cas s'intéresse généralement à la modélisation de mémoire pour comprendre, apprendre et agir, tandis que le raisonnement par analogie s'intéresse prioritairement aux inférences réalisées.

### 3 LE RAISONNEMENT A PARTIR DE CAS

#### 3.1 Principes de base

Le Raisonnement à partir de Cas, désigné par le sigle anglo-saxon CBR -« Case Based Reasoning »- trouve ses origines dans les modèles psychologiques de la mémoire et de l'expertise humaine. L'application de ces modèles à des structures informatiques, aboutissant au raisonnement à partir de cas, a débuté au début des années 80 [Schank, 82 ; Kolodner & Riesbeck, 86 ; Kolodner, 88a]. Roger Schank joua un rôle majeur dans cette modélisation. Ses travaux, sur la théorie de la dépendance conceptuelle [Schank, 73], la théorie des gabarits [Schank & Abelson, 77], enfin la théorie de la mémoire dynamique [Schank, 82], sont les fondements du CBR.

Dans la théorie de la dépendance conceptuelle, R. Schank propose un modèle informatique de la compréhension du langage naturel. Pour comprendre une phrase en langage naturel, l'analyseur syntaxique de langage explore la syntaxe d'une phrase par une stratégie dans un premier temps ascendante (parcours séquentiel symbole par symbole). Puis, dès que des informations conceptuelles sont partiellement reconnues, l'analyseur adopte une stratégie descendante guidée par le contenu complet de ces informations conceptuelles, servant de modèles pour guider la compréhension. Ainsi, au cours du processus de compréhension, une expression en langage naturel est mise en correspondance avec une structure conceptuelle, représentant le sens de cette expression. Cette structure est un réseau de dépendances conceptuelles, formé de concepts et de liens unissant ces concepts aux concepts qui en dépendent sémantiquement.

La théorie des gabarits a été inspirée par les travaux des psychologues sur la théorie des schémas [Bartlett, 32]. Schank et Abelson reconnaissent que l'étude du contenu et de l'organisation de ces informations, en une entité appelée mémoire, doit précéder la compréhension du langage naturel. Cette mémoire, qui est seulement une partie de la mémoire humaine<sup>52</sup>, est construite autour de gabarits<sup>53</sup>.

Dans la théorie de la mémoire, partant d'une étude des limitations de la théorie des gabarits, Schank propose de concevoir et implémenter une *mémoire dynamique*, c'est-à-dire capable de se modifier automatiquement pour devenir de plus en plus performante dans la tâche de compréhension du langage naturel. Ainsi, cette théorie complète la

---

<sup>52</sup> Dite à long terme : la mémoire épisodique. Celle-ci rassemble des épisodes, ou expériences personnelles, contextualisées, d'un sujet.

<sup>53</sup> Un gabarit (« script ») est une source de connaissances permettant de contrôler des inférences et de relier des textes, ou d'autres connaissances, dans des domaines très contraints et stéréotypiques.

précédente par l'apparition de la capacité d'apprentissage. Désormais, compréhension du langage, mémoire et apprentissage sont inséparables<sup>54</sup>.

Schank définit les structures de « haut niveau » en mémoire (MOPs<sup>55</sup>, TOPs<sup>56</sup>, scènes<sup>57</sup>, gabarits, buts) et les relations existant entre elles : relations d'organisation et relations de généralisation. L'apprentissage prend deux formes : l'indexation, et la généralisation (Cf. chap. V). L'indexation est l'établissement d'un lien entre des structures, signifiant que l'une d'elles est une situation particulière, ou une exception, par rapport à l'autre. La généralisation est la création d'une nouvelle structure par mise en commun des éléments de description similaires de plusieurs structures. Elle intervient lorsque des liens d'indexation se répètent au cours du temps.

Cette théorie a donné lieu aux premiers systèmes de raisonnement à partir de cas [Slade, 91]. Les chercheurs du domaine ont étudié la problématique du raisonnement à partir de cas, qui est double. D'une part, c'est une méthodologie de l'intelligence artificielle qui peut compléter les autres méthodologies de l'IA, telles que le raisonnement à partir de règles, le raisonnement à partir de modèles et le raisonnement par classification. D'autre part, elle propose un modèle cognitif unifié des processus de raisonnement, de mémorisation et d'apprentissage.

D'un point de vue cognitif, ce mode de raisonnement est à la base de théories psychologiques du comportement humain, en particulier lors de la prise de décision.

Exemple :

*Un spécialiste en finance qui traite un problème difficile d'attribution de crédit, se rappelle un cas précédent où une entreprise dans les mêmes conditions a fait faillite. Il préconise alors de refuser le crédit.*

### 3.2 Principe général du raisonnement à partir de cas

L'approche CBR bénéficie des recherches faites sur les SE et se veut donc plus large, comme le suggère J. Kolodner :

*« We can develop an appropriate symbolic relationship between people and machines. The idea case-based reasoning is that the computer augments the person's memory by providing cases (analogs) for a person to use in solving a problem ».*

Selon S. Slade: « *case-based reasoning is a psychological theory of human cognition* », qui aurait plus particulièrement pour objectif de traiter les questions relatives à la

---

<sup>54</sup> Kolodner, 93 paragraphe 4.2 pp 105.

<sup>55</sup> Un MOP (Memory Organization Packets) est constitué d'un ensemble de scènes dirigées vers la réalisation d'un but.

<sup>56</sup> Un TOP (Thematic Organisation Packets) est constitué d'un type de but, et des conditions de planification associées à ce type de but. Une bonne synthèse sur la théorie de la mémoire, où on trouvera toutes ces notions, a été faite par I. Bichindaritz, 94.

<sup>57</sup> Une scène est une structure regroupant des actions partageant un même but.

mémoire, l'apprentissage, la planification et la résolution de problèmes. Les problèmes majeurs liés à cette approche sont l'indexation des cas (stockage et mise à jour), la récupération (présentation du/des bon cas au moment approprié) et l'adaptation. Répondre à ces problèmes (en IA) revient à poser (à la psychologie) la question de l'organisation de la mémoire épisodique<sup>58</sup> et des mécanismes sous-jacents au raisonnement analogique [Slade, 91].

D'un point de vue psychologique, le CBR (Case-Based Reasoning) [Kolodner, 87], [Harmon, 93] se réfère au raisonnement à l'aide duquel l'être humain résout des problèmes en se basant sur des problèmes déjà résolus précédemment. L'application de stratégies qui se sont révélées satisfaisantes dans la résolution de problèmes similaires constitue une étape importante de cette méthode. Si le cas traité ne ressemble à aucun des cas déjà résolus dans le passé, le nouveau problème ainsi que sa solution seront mémorisés afin de pouvoir être exploités dans la résolution de nouveaux problèmes qui vont se présenter.

Le CBR comprend une base de cas, une méthode de stockage des nouveaux cas, un système d'indexation de ces cas permettant de les retrouver, des méthodes pour évaluer la similitude entre les cas, et enfin une méthode d'adaptation de la solution proposée.

Le stockage d'un nouveau cas en mémoire est l'apprentissage de base effectué par un système de raisonnement à partir de cas. Un autre type d'apprentissage peut se produire à l'issue de la phase d'évaluation lorsque la solution se révèle inexacte. Les connaissances apprises doivent éviter de refaire à l'avenir la même erreur.

### 3.3 Types de raisonnement à partir de cas

Janet Kolodner [Kolodner, 93] dégage deux types d'utilisation de CBR : *la résolution de problèmes* et *l'interprétation* : « *to help us understand and assess situations, and to help us solve problems* ».

#### 3.2.1 Résolution de problèmes

Elle consiste à trouver un chemin, par une suite d'actions ou inférences, entre les données d'un problème, et une ou plusieurs solutions.

Le CBR est utilisé dans cette approche pour effectuer de la **conception** et de l'**ingénierie** (CADET [Sycara & Navinchandra, 91a, 91b], JULIA [Kolodner, 88b], XANA [Mostow & Fisher, 89]), de la **planification** (PERSUADER [Sycara, 88, 89], CHEF [Hammond, 88, 90], PLEXUD [Alterman, 86]), du **diagnostic** (CASEY [Koton, 88], PROTOS [Bareiss, 89a, 89b]). La résolution de problèmes comporte quelques difficultés techniques, essentiellement au niveau des méthodes d'adaptation à mettre en œuvre.

---

<sup>58</sup> Le terme épisodique désigne les connaissances portant sur des expériences particulières et concrètes [Tulving, 76]

### 3.2.2 Interprétation

Elle permet l'évaluation d'une situation nouvelle par confrontation à un ensemble de situations connues et mémorisées.

Le raisonnement à partir de cas est utilisé dans trois aspects de l'interprétation : la **justification** qui est le développement d'une argumentation, équivalent à la jurisprudence en droit. La **classification** ou l'explicitation de l'appartenance d'un cas à différents concepts, dont les limites peuvent être floues. La **projection** qui est la prévision des effets d'une décision en se basant sur une expérience de décisions et de leurs effets respectifs. Dans ce domaine on exploite particulièrement les informations relatives aux échecs et aux erreurs.

Dans tous ces domaines, on modélise le niveau de confiance que l'on peut attribuer à un CBR. Ce niveau de confiance est croissant avec le temps, et est fonction de l'expérience et de la particularité des cas que le système peut résoudre. On dit ainsi d'un CBR qu'il est successivement novice, apprenti et expert.

Dans le raisonnement à partir de cas dit interprétatif, le but du raisonnement n'est pas de converger vers une solution, mais de proposer une argumentation reliant les différents cas remémorés, contrairement au raisonnement à partir de cas dit de résolution de problèmes qui a plutôt pour but de converger vers une solution.

Des prototypes de systèmes, dans les deux types de raisonnement (interprétation et résolution de problèmes), ont atteint un degré de maturation permettant leur utilisation dans l'industrie.

## 3.4 Eléments du raisonnement à partir de cas

La réalisation de système basés sur le raisonnement à partir de cas nécessite la mise en œuvre d'une base d'expériences ou de cas (appelé aussi mémoire), d'un mécanisme d'indexation et d'extraction des cas similaires et d'un mécanisme d'adaptation ou de justification.

### 3.4.1 Cas et Mémoire

Les structures en mémoire sont en premier lieu des *cas*<sup>59</sup>. Un *cas* est un ensemble d'informations liées à une situation donnée du monde réel, relatives aussi bien à la description de cette situation et à celle de son contexte, à la solution apportée à cette situation, qu'à l'état résultant du monde quand la solution a été effectuée [Kolodner, 93].

Ces informations peuvent être représentées sous des modes divers : des frames, des scénarios, des prédicats, une représentation de type relationnel, une représentation de type objet.

---

<sup>59</sup> Bien que certains auteurs proposent d'autres structures telles que les concepts, les modèles, les prototypes, ou les points de vue.

Shank a défini trois types de cas [Schank & Riesbeck, 89] :

- Les cas *ossifiés* assimilables à une règle générale, qui ne sont associés à aucune expérience vécue ; les proverbes en sont un exemple.
- Les cas *paradigmatiques*. Ces cas sont moins généraux que les premiers. Ils sont notamment reliés à un ensemble de situations.
- Les *histoires*, qui constituent des cas uniques. Elles sont détaillées, ce qui les rend exploitables pour diverses utilisations. Elles constituent la base du raisonnement à partir de cas.

Les cas mémorisés sont ceux qui sont utiles au raisonnement, soit pour l'orienter positivement, soit pour le prévenir des échecs. Ils doivent être représentés de manière à pouvoir être discernés les uns des autres et ainsi permettre de retrouver le bon cas vis-à-vis de l'objectif à atteindre [Rougegrez-Loriette, 94]. La détermination des informations utiles aux raisonnements futurs constitue le problème de l'indexation.

L'aspect *organisation de la mémoire* est crucial pour la mise en place d'un système CBR, il a fait l'objet de nombreuses recherches ( [Ashley & Rissland, 88], [Kolodner & Simpson, 89] [Kolodner, 91b, 91c, 93]. Parmi les structures d'organisation de la mémoire nous distinguons :

⇒ *La mémoire plate ou en vrac*<sup>60</sup>, les cas sont rangés séquentiellement sous la forme d'une liste simple, d'un tableau, d'une file.

⇒ *La mémoire hiérarchique*, les cas sont mémorisés ou accessibles à partir des noeuds d'un réseau (en général une arborescence) ; cette organisation est proposée pour optimiser la recherche. Il existe essentiellement deux types d'organisations hiérarchisées :

- *organisation en réseaux à traits (caractéristiques) partagés*, les cas sont regroupés suivant leurs similarités. La mémorisation peut être redondante, ce qui signifie qu'un même cas peut être stocké à plusieurs endroits dans la mémoire. La construction de la hiérarchie peut être dynamique au cours du raisonnement, comme dans HYPO<sup>61</sup> [Ashley & Rissland, 88].

- *organisation en réseaux de discrimination*, les cas sont regroupés suivant des indices à fort pouvoir de discrimination. Certains de ces réseaux sont redondants, comme dans CYRUS (Computerized Yale Retrieval and Update System) [Kolodner, 93].

### 3.4.2 Indexation

L'indexation consiste en la sélection d'un certain nombre de descripteurs qui deviennent des *index* du cas. Ce mécanisme s'appuie sur des structures d'indexation, permettant l'organisation des cas de la base pour un accès rapide à ceux-ci, et sur des mesures de similarité assurant une sélection fine et pertinente des cas les plus proches

---

<sup>60</sup> Ce terme a été cité par M. Maurice-Demourieux, B. Laâsri, C. Levallet et S. Pinson.

<sup>61</sup> Hypo is an interpretive reasoner that works in the domain of law [Kolodner, 93], pp 48-51.

du cas en entrée.

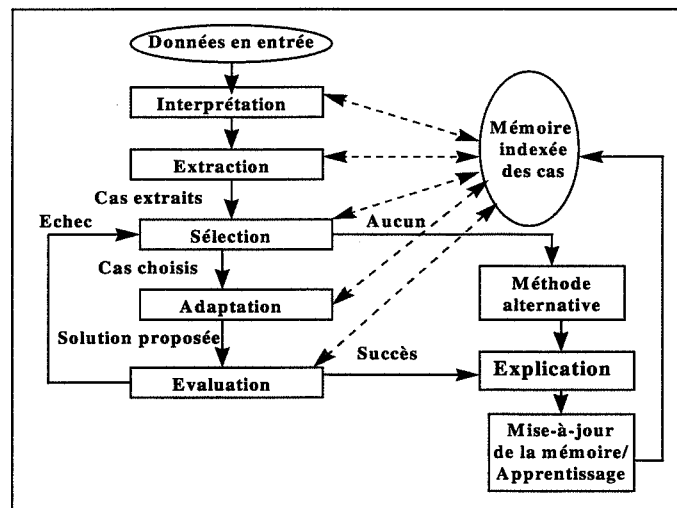
Les index sont les éléments de la représentation des cas retenus comme significatifs pour la tâche à résoudre. Ils sont exprimés en fonction du vocabulaire de description du domaine. Ils peuvent être un sous-ensemble des traits décrivant les cas. Par exemple dans CHEF [Hammond, 88, 90], les index dans les cas représentant une recette sont les ingrédients, la texture et le goût des aliments, etc..

Les index sont des labels attribués aux cas selon plusieurs critères :

- **la prédictivité** d'un élément de description est son pouvoir de prédiction vis-à-vis d'un cas. Ce critère est quantifiable par l'intensité avec laquelle un élément de description doit entraîner la remémoration d'un cas particulier.
- **le pouvoir de discrimination** d'un élément de description est d'autant plus élevé que le nombre de descriptions de cas le contenant est faible.
- **la pertinence** d'un élément vis-à-vis d'un point de vue, ou d'un contexte, la possibilité d'établir une relation entre ce trait et le point de vue<sup>62</sup>. Ce critère est quantifiable par l'intensité de l'importance d'un élément de description dans son contexte ou point de vue. Evaluer une importance, c'est évaluer les différents rôles que joue cet élément de description, et les synthétiser.

### 3.4.3 Le raisonnement

Le cycle classique d'un raisonnement à partir de cas<sup>63</sup> comporte un certain nombre d'étapes décrites dans la figure III. 2 :



*Figure III. 2 : Architecture classique d'un CBR*

#### 3.4.3.1 Interprétation des données

<sup>62</sup> Le point de vue est un filtre sur les domaines de connaissances. La notion de contexte sera vue au chapitre V.

<sup>63</sup> Ce raisonnement à partir de cas dédié à la résolution de problème, car un système dédié à l'interprétation de situation ne comporte pas les phases de proposition de la solution et donc d'adaptation et d'évaluation de la solution proposée.

Cette étape consiste à évaluer le problème en entrée, à analyser sa description initiale et le transformer de manière à ce qu'il soit exprimé dans le même vocabulaire que les cas en mémoire. Le nouveau problème devient un nouveau cas qui sera indexé.

#### 3.4.3.2 Recherche et Extraction des cas candidats

Cette étape permet de sélectionner un ou souvent un ensemble de cas candidats potentiels au raisonnement. Les algorithmes de recherche et d'extraction de ces cas sont fortement dépendants de l'organisation de la mémoire.

⇒ Dans les organisations dites plates, la recherche des cas potentiels est une recherche en largeur. L'algorithme de recherche consiste, pour tous les cas stockés, à comparer le cas courant au cas extrait. Il retourne les cas les plus similaires.

- **Avantages** : on explore systématiquement toute la base de cas, donc on est sûr de trouver le ou les meilleurs cas ; l'ajout d'un cas est très facile;
- **Inconvénients** : la recherche séquentielle est très longue, vu que nous devons examiner toute la base, ainsi l'extraction d'un cas est très coûteuse.

⇒ Dans les organisations hiérarchiques, nous effectuons une recherche en profondeur, elle peut être séquentielle ou parallèle.

Comme le souligne I. Bichindaritz, dans les réseaux à traits partagés (cf. § 3.4.1), la descente dans la hiérarchie consiste à rechercher à chaque niveau les noeuds dont les traits sont partagés par un nouveau cas. Dans les réseaux de discrimination, la descente consiste à choisir les noeuds pour lesquels le nouveau cas répond favorablement à une question.

- **Avantages** : ce procédé est plus efficace en temps de recherche que le précédent,
- **Inconvénients** : l'ajout d'un cas est plus difficile, avec cette méthode, nous n'explorons pas la totalité de l'espace de recherche<sup>64</sup>, donc nous pouvons oublier des cas dignes d'intérêt.

Dans [Simoudis & Miller, 91a, 91b], l'extraction se déroule en deux phases : une extraction suivant une similarité de surface, dans laquelle les éléments de description sont utilisés sans transformation, suivie par la recherche ou la construction d'une justification pour valider la pertinence des cas extraits.

James P. Callan, Tom E. Fawcett et Edwina L. Rissland [Callan & al., 91, 92] ont réalisé le système « CABOT », qui a pu analyser les raisons de ses échecs d'extraction des cas de la mémoire, et les a réparti en trois classes :

⇒ **Une erreur d'extraction**, un cas existe en mémoire pouvant donner le bon résultat, et il n'a pas été extrait. Il faut alors adapter la métrique de similarité.

⇒ **Une erreur d'adaptation**, le cas extrait est correct, mais c'est l'adaptation qui est

---

<sup>64</sup> Ce problème ne se pose pas pour les réseaux de discrimination redondants.



erronée.

⇒ **Un manque d'information**, un cas similaire n'existe pas en mémoire, il faut donc l'acquérir.

### 3.4.3.3 Sélection du meilleur candidat

La sélection du meilleur candidat est réalisée par l'application de la mesure de similarité, qui permet d'ordonner les candidats par ordre décroissant de ressemblance. L'appariement comprend au moins deux étapes :

⇒ **la détermination des correspondances**, c'est-à-dire des traits à appairer dans la description des cas ;

⇒ **le calcul du degré de similarité entre deux cas**, qui est fonction :

- **d'une mesure de la similarité entre deux traits<sup>65</sup>** : soit deux traits  $f_i$ , l'un appartenant au nouveau cas en entrée  $E$ , et l'autre à un cas mémorisé  $M$ . La fonction  $\text{sim}(f_i^E, f_i^M)$  peut être quantitative ou qualitative.
- **d'une mesure de l'importance  $w$  attribuée à chaque trait**, qui peut être calculée par des méthodes statistiques ou analytiques, ou attribuée par un expert ; elle peut être quantitative ou qualitative.

La méthode la plus couramment utilisée pour calculer le degré de similarité est la méthode du plus proche voisin (« nearest-neighbor »), ou le score d'appariement est donné par la formule :

$$\frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \text{sim}(f_i^E, f_i^M)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Ce score est la moyenne pondérée des similarités de chaque trait.

Comme la mesure de similarité est au coeur du processus de recherche et de sélection des cas, et comme la nature des connaissances du domaine (surtout des traits) est différente, il nous semble donc indispensable de ne pas se contenter de cette formule, et de nous pencher un peu plus sur cet aspect.

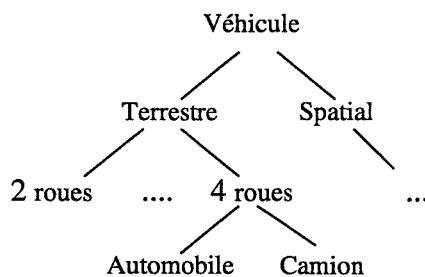
Une mesure de similarité peut être définie de manière logique ou statique [Bisson, 93]. Une mesure logique s'appuie sur la comparaison entre la description des cas (nombre de valeurs identiques ou proches par rapport au nombre de descripteurs). La distance de Hamming ou la distance euclidienne sont des mesures logiques. Une mesure statique s'exprime à partir d'un échantillon de cas. Elle est égale à zéro si les valeurs de deux cas pour un descripteur sont différentes et elle est égale à l'inverse du nombre de cas ayant la même modalité sur l'ensemble des cas si les valeurs sont égales, exemple la distance  $\chi^2$  [Auriol, 95].

<sup>65</sup> Nous signalons aux lecteurs que « traits » est synonyme de « éléments de description ». La terminologie n'est pas encore unifiée.

Dans tous les cas, l'évaluation de la similarité entre deux cas est basée sur l'estimation des similarités locales *sim<sub>j</sub>* entre les valeurs de chaque descripteur  $y_j$ . Puis les similarités locales sont agrégées sur la base d'une fonction de sommation pour produire la similarité globale *SIM* entre deux cas.

La définition d'une similarité locale varie en fonction du type de descripteur (booléen, nominal, ordinal, numérique, taxinomie) et de la taille des ensembles sur lesquels la similarité est évaluée.

- Un descripteur **nominal** est défini par l'application d'une variable  $y_i$  sur un ensemble fini de valeurs non ordonnées  $V_i = \{V_{i1}, \dots, V_{in}\}$ . Si le nombre de valeurs que peut prendre simultanément  $y_i$  est supérieur à 1, on dit que le descripteur est **multivalué**. Dans le cas contraire, il est dit **monovalué**.
- Un descripteur **ordinal** est un descripteur nominal dont les valeurs sont ordonnées suivant un ordre  $\leq$ . Exemple : Mois = {Janvier, Février, ..., Décembre}
- Lorsque les valeurs d'un descripteur nominal (ou ordinal) sont reliées par une hiérarchie, le descripteur est dit **taxinomique**. Ainsi par exemple, on peut introduire une taxinomie sur le descripteur « Véhicule » :



- Un descripteur **numérique** peut prendre ses valeurs dans un ensemble d'entiers (cas discret) ou de réels (cas continu). En général, cet ensemble est délimité par des bornes inférieures et/ou supérieures.

De nombreuses mesures de similarités locales sont connues dans la littérature (fig. III. 3 : d'après [De Carvalho, & al., 90] et [Auriol, 95]). Nous considérons :

- $V_1, V_2$  : l'ensemble des valeurs prises par deux cas  $C1$  et  $C2$  pour un descripteur  $y$  donné ;
- $O$  : l'ensemble des valeurs atteignables par un descripteur ;
- $h$  : hauteur d'un niveau dans une taxinomie ;
- $Card$  : taille d'un ensemble ;
- $V_1^-, V_1^+ (V_2^-, V_2^+)$  : bornes inférieure et supérieure de  $V_1$  (resp. de  $V_2$ ) ;
- $V_{1c} (V_{2c})$  : point central de l'intervalle  $V_1$  (resp. de  $V_2$ ) ;
- $ec(I)$  : valeur absolue entre les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle  $I$ .

### ① Mesure de similarité locale

	Mesures de similarité locale	Descripteur	Valuation	Référence
1.	$= 0$ , si $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ $= 1$ , si $V_1 \cap V_2 \neq \emptyset$	nominal	monovalué multivalué	[Michalski & Stepp, 82]
2.	$\frac{Card(V_1 \cup V_2) - Card(V_1 \cap V_2)}{card(V_1 \cup V_2)}$	nominal	multivalué	[Die & Nie, 87]
3.	$\frac{Card(V_1 \cup V_2) - Card(V_1 \cap V_2)}{\min(V_1 \cup V_2)}$	nominal	multivalué	[Gebhardt, 89]
4.	$\frac{Card(V_1 \cup V_2) - Card(V_1 \cap V_2)}{\max(V_1 \cup V_2)}$	nominal	multivalué	[Gowda & Diday, 91]
5.	$\frac{Card(V_1 \cup V_2) - Card(V_1 \cap V_2)}{Card(O)}$	nominal	multivalué	[Manabu, 88]
6.	$\frac{ec(\min(V_1^-, V_2^-), \max(V_1^+, V_2^+)) - Card(V_1 \cap V_2)}{Card(O)}$	ordinal numérique	multivalué	[Manabu, 88]
7.	$\frac{ V_1 - V_2 }{ec(O)}$	numérique	monovalué	[Michalski & Stepp, 82]
8.	$\frac{ V_{1c} - V_{2c} }{ec(O)}$	numérique	multivalué	[Xu, 87]
9.	$\frac{ec(\min(V_1^-, V_2^-), \max(V_1^+, V_2^+)) - ec(V_1 \cap V_2)}{ec(O)}$	numérique	multivalué	[Manabu, 88]
10.	$\frac{ec(V_1 \cup V_2) - ec(V_1 \cap V_2)}{ec(V_1 \cup V_2)}$	numérique	multivalué	[Gowda & Diday, 91]
11.	$\frac{ec(V_1 \cup V_2) - ec(V_1 \cap V_2)}{\min(ecV_1, ecV_2)}$	numérique	multivalué	[Manabu, 88]
12.	$\frac{ec(V_1 \cup V_2) - ec(V_1 \cap V_2)}{\max(ecV_1, ecV_2)}$	numérique	multivalué	[Manabu, 88]
13.	$\frac{2 \times h(V_1 \cup V_2) - h(V_1) - h(V_2)}{2 \times h_{\max}}$	taxinomie	multivalué	[Diday, 89]
14.	$\frac{h(\text{noeud\_réunissant\_}V_1\text{\_et\_}V_2)}{\text{hauteu\_totale\_de\_}h}$	taxinomie	monovalué	[Xu, 87]

Figure III. 3 : Mesures de similarité locale

## ② Mesure de similarité globale

Une fois qu'un type de similarité locale a été choisi pour chaque descripteur, nous combinons ces différentes mesures locales en une mesure globale. Une similarité globale *SIM* entre deux cas  $C_1$  et  $C_2$  décrit par  $p$  descripteurs peut être écrite :

$$SIM(C_1, C_2) = F(sim_1(V_{11}, V_{21}), (sim_2(V_{12}, V_{22}), ..., (sim_p(V_{1p}, V_{2p})))$$

où  $F : [0, 1]^p \rightarrow [0, 1]$  est une fonction d'agrégation

Une synthèse<sup>66</sup>, sur les mesures de similarité globale les plus utilisées dans la pratique, a été faite par E. Auriol (voir fig. III. 4) :

	Similarité globales	Nom	Description
1.	$\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p sim_i(V_{1i}, V_{2i})$	City-Block	Plus court trajet dans une ville aux rues rectilignes
2.	$\sum_{i=1}^p w_i \times sim_i(V_{1i}, V_{2i})$	City-Block pondérée	L'importance des descripteurs est pondérée
3.	$\frac{1}{p} \sqrt[p]{\sum_{i=1}^p sim_i(V_{1i}, V_{2i})^p}$	Euclidienne	Plus court chemin d'un point à un autre dans un espace euclidien
4.	$\frac{1}{p} \sqrt[p]{\sum_{i=1}^p sim_i(V_{1i}, V_{2i})^r}$	Minkowski	Généralisation de la précédente
5.	$\sqrt[p]{\sum_{i=1}^p w_i \times sim_i(V_{1i}, V_{2i})^r}$	Minkowski pondérée	L'importance des descripteurs est pondérée
6.	$\max_i w_i \times sim_i(V_{1i}, V_{2i})$	Maximum pondérée	Distance «optimiste»

Figure III. 4 : Mesures de similarité globale

- $w_i$  : pondération associée au descripteur  $y_i$  ( $\sum_{i=1}^p w_i = 1$ )
- $V_{1i}$  (resp.  $V_{2i}$ ) : ensemble des valeurs possibles pour  $C_1$  (resp.  $C_2$ ) pour le descripteur  $y_i$

<sup>66</sup> Faite à partir des travaux de [Sneath & Sokal, 63], [Jardine & Sibson, 71], [Ichino, 91], etc..

- $sim_i$  : mesure de similarité locale relative au descripteur  $y_i$ .

Dans le cas des descripteurs booléens (c'est-à-dire  $y_i(C) \in \{0, 1\} \forall i = 1, \dots, p$ ), certaines formules de mesures de similarité globale proviennent des statistiques ([Watanabe, Bock, Diday, etc]), d'autres sont liées aux sciences cognitives (sémantique des descripteurs) comme celle proposée par [Tversky,77] :

$$a \times \sum_{y_i \in a} w_i - b \times \sum_{y_i \in b} w_i - c \times \sum_{y_i \in c} w_i$$

où  $w_i$  représente la pondération associée au descripteur  $y_i$

- $a = \sum_{i=1}^p y_i(C) \times y_i(C') =$  nombre de valeurs communes à  $C$  et  $C'$  ;
- $b = \sum_{i=1}^p y_i(C) \times \bar{y}_i(C') =$  nombre de valeurs présentes dans  $C$  et absentes dans  $C'$  ;
- $c = \sum_{i=1}^p \bar{y}_i(C) \times y_i(C') =$  nombre de valeurs présentes dans  $C'$  et absentes dans  $C$  ;
- $d = \sum_{i=1}^p \bar{y}_i(C) \times \bar{y}_i(C') =$  nombre de valeurs simultanément absentes dans  $C$  et  $C'$ .

#### 3.4.3.4 Utilisation/Adaptation<sup>67</sup>

En général l'utilisation des cas dépend du type de tâche réalisée : interprétation ou résolution de problèmes [Bichindaritz, 94] :

⇒ en **résolution de problèmes**, l'utilisation d'un cas pour résoudre un nouveau cas prend trois formes [Kolodner, 88] :

- transférer sa solution (directement ou en l'adaptant) ;
- transférer sa séquence de résolution (directement ou en l'adaptant) ;
- et..

L'adaptation est un moyen de modifier localement la démarche et/ou la solution du cas source pour prendre en compte les particularités du cas cible. Nous distinguons les méthodes d'adaptation suivantes :

① **principe de substitution**, qui consiste à remplacer certaines valeurs jugées inadéquates de la solution de l'ancienne situation par de nouvelles valeurs.

- le *remplacement*, consiste à remplacer des objets par des nouveaux. Par exemple dans CHEF<sup>68</sup>, la viande de boeuf et du brocolis sont remplacés par le poulet et des haricots pour créer la nouvelle recette. J. Kolodner met l'accent sur le terme de

<sup>67</sup> J. Kolodner a fait, une description détaillée de cette étape, dans son livre Case-Based Reasoning, 93, chapitre 11 et 12, pp393-468.

<sup>68</sup> Exemple tiré de Kolodner, 93 pp 398 paragraphe 11.1.1.

«rôle » des viandes et des légumes verts.

- l'*ajustement de paramètres*, consiste à ajuster les valeurs numériques de paramètres d'une solution. Par exemple dans JUDGE, on ajuste l'ancienne sentence de 25 ans de prison à 15 ans (plus ou moins de 50%), car dans les deux cas la victime est décédée, mais un cas était intentionnel, l'autre accidentel.

- etc..

## ② principe de transformation

- la *transformation de sens commun* : des heuristiques sont utilisées pour remplacer, ajouter ou effacer des parties (des traits entiers) d'une solution.

- l'*adaptation et la réparation dirigées par un but* : c'est une adaptation totalement dépendante du domaine. Quand les traits de l'ancien et du nouveau cas sont différents, on extrait ces différences, on les évalue en utilisant le modèle causal disponible, on les caractérise. Enfin pour chaque différence, on applique le modèle proposé par J. Kolodner dit « model-guided repair heuristic » approprié à l'ancienne solution pour en créer une nouvelle.

③ **principe de dérivation**, elle consiste à ré-exécuter une ancienne solution à partir de la nouvelle situation pour obtenir une nouvelle solution.

⇒ en *interprétation*, la construction d'une argumentation est particulière à chaque système, et est actuellement rudimentaire. Elle peut être représentée comme une trace des étapes précédentes du raisonnement à partir de cas, dont l'étape d'utilisation est une mise en forme en langage naturel.

### 3.4.3.5 Evaluation

L'évaluation de la qualité de la solution ou de l'interprétation proposées par le système de raisonnement à partir de cas comporte deux facettes :

⇒ *une évaluation interne* : cette évaluation est un raisonnement critique du système sur son propre travail (un raisonnement remettant en cause ses propres raisonnements, c'est un méta-raisonnement<sup>69</sup> nécessitant des méta-connaissances [Pitrat, 90]), avant la rétroaction du monde réel.

⇒ *une évaluation externe* : la confrontation de la solution ou de l'interprétation avec l'expérience dans le monde réel, ou dans un monde le simulant, peut être un succès ou un échec ; dans ce dernier cas, elle conduit alors à une explication de l'échec et à sa mémorisation. Ce type d'évaluation, et les explications qu'il engendre, précèdent l'apprentissage.

### 3.4.3.6 Apprentissage

---

<sup>69</sup> c'est une réflexion du système sur ses propres compétences.

*« Learning is, thus, to at least some extent, an emergent behavior that arises from the case-based reasoner's normal functioning ».*

*J. Kolodner, 93*

L'apprentissage en CBR est étroitement lié au raisonnement et à la remémoration. Il répond à une anticipation par le système des situations à venir : la mémoire est tournée vers l'avenir. L'anticipation concerne à la fois l'évitement des situations ayant posé problème, et la performance dans les situations de réussite. Il consiste, en général, en la création, la modification et l'organisation des structures en mémoire. Il comprend plusieurs étapes [Bichindaritz, 94] :

⇒ **L'ajout d'un cas en mémoire**<sup>70</sup>, en CBR, l'apprentissage est :

- Premièrement, la simple **accumulation des cas**, (comme dans MEDIATOR<sup>71</sup> [Kolodner & al., 85], PERSUADER [Sycara, 88], et CHEF [Hammond, 90])<sup>72</sup>.
- Deuxièmement, la **sélection des cas** mémorisés, certains systèmes proposent de contrôler<sup>73</sup> l'accumulation des cas afin de préserver l'efficacité du rappel des cas, par exemple, le système PROTOS [Bareiss, 89a, 89b] s'appuie sur les conseils d'un expert pour ne pas garder en mémoire des cas trop similaires.
- Enfin, **l'élaboration des cas**, lorsqu'un cas n'existe pas pour une situation, il est créé et alors ajouté à la mémoire (AQUA<sup>74</sup> [Ram, 93]).

⇒ **Les explications**, les explications générées par le système, lui permettent de relier les résultats de son raisonnement, échec ou succès, aux informations remémorées. Dans l'apprentissage, elles permettent d'anticiper les expériences à venir, de plus, leur qualité se reflète dans le choix des indices PROTOS [Bareiss, 89a, 89b].

⇒ **Le choix des indices**, un indice est un label assigné à un cas, il est pertinent pour celui-ci. Le choix des indices qui se pose au moment de l'apprentissage est un aspect essentiel du problème de l'indexation, et conditionne l'accès à la mémoire dans l'avenir. Il est généralement<sup>75</sup> décidé par le système automatiquement. Il prend la forme d'une assignation de crédits aux traits ayant conduit à choisir la solution ayant réussi, et de blâmes aux traits responsables des échecs. Le mécanisme le plus classique est l'association d'un compteur à chaque trait, l'attribution de crédit correspondant alors à une incrémentation du compteur, et le blâme à une décrémentation. Les indices sélectionnés dans l'avenir sont ceux possédant les compteurs les plus élevés. Ce sont les indices ayant le plus grand pouvoir de prédiction qui sont privilégiés.

⇒ **L'organisation de la mémoire**, pour une meilleure efficacité lors du rappel des cas.

<sup>70</sup> Aussi appelé apprentissage par consolidation

<sup>71</sup> Qui possède deux mémoires séparées, une des échecs, et l'autre des succès

<sup>72</sup> Pour ces trois systèmes, l'apprentissage est proche de l'apprentissage par cœur.

<sup>73</sup> Quoique l'indexation reste la principale solution apportée au problème de l'accumulation des cas.

<sup>74</sup> Bref historique d'AQUA : AQUA reads newspaper stories (Terrorism domain). Its tasks intelligent questions in an effort to understand novel aspects of incoming stories, uses those questions to focus the understanding process, and learns by answering its questions and asking new ones. Cases in its memory guide the process.

<sup>75</sup> Car parfois, il peut être réalisé manuellement par les experts.

⇒ **L'affinement des cas**, ce problème complexe est une caractéristique de la mémoire humaine. Peu de systèmes CBR ont étudié le problème de la révision des connaissances sur les cas mémorisés, en réponse aux expériences nouvelles rencontrées. La modification de l'indexation attachée à un cas est souvent la seule méthode utilisée pour faire évoluer la connaissance sur un cas.

La recherche d'une méthode alternative est utile, lorsque les échecs sont répétés, et surtout lorsqu'il n'y a pas en mémoire, de cas traités suffisamment similaires.

Le modèle présenté au paragraphe 3.4.3 (cf. fig. III. 2) est particulièrement représentatif de l'approche méthodologique du raisonnement par cas. Il a été repris et modifié (modifications mineures) par [Hammond, 86], [Woltercroft, 89], [Slade, 91], et [Aamodt & Plaza, 94] qui ne considèrent que quatre processus :

- La **recherche** (« retrieve ») du (ou des) cas le(s) plus similaire(s) par rapport à un nouveau problème donné ;
- l'**utilisation** (« reuse ») de l'information et de la connaissance contenues dans ce(s) cas afin de suggérer une solution ;
- l'**adaptation** (« revise ») de cette solution au nouveau problème ;
- l'**apprentissage** (« retain ») du problème résolu dans la base de cas.

Un nouveau problème est résolu en retrouvant un ou plusieurs cas déjà résolus, en utilisant le ou les cas retrouvés d'une manière quelconque (transfert de la solution, du processus de résolution, de la justification), en adaptant la solution obtenue et enfin en apprenant les informations apportées par le nouveau problème résolu et en le stockant dans la base de cas.

Dans la suite de ce mémoire (chap. V), nous allons nous baser sur les travaux<sup>76</sup> de Aamodt et Plaza pour décrire le raisonnement et l'apprentissage adoptés par les agents. L'environnement proposé par ces auteurs est extrêmement riche et capable d'évolution, de spécialisation. Il s'agit d'une démarche typique du génie logiciel appliqué à la maîtrise des systèmes à base de connaissance [Mille, 95]. Une partie du système que nous proposons est en quelque sorte une spécialisation du système générique de Aamodt et Plaza. L'autre partie va trouver ses racines dans l'approche SMA qui sera présenté au paragraphe 4.

Une lacune de l'apprentissage en IA est d'aborder le problème de l'apprentissage comme un processus uniquement cognitif, et non pas social. Même lorsque l'on modélise une expertise d'un seul expert, on néglige le fait que l'expertise de cet expert est issue d'une expérience construite autour de relations sociales de cet expert avec son environnement (entreprise, réseau d'experts, ...). L'IAD et notamment les systèmes multi-agents tentent de combler cette lacune.

---

<sup>76</sup> Le choix de ces travaux se base tout simplement sur la simplicité et la clarté de représentation.



## 4 L'APPRENTISSAGE EN UNIVERS MULTI-AGENTS

L'apprentissage est un axe de recherche de plus en plus important et prometteur dans le domaine des systèmes d'IAD ([Sekaran, 94], [Sen, 94], [Mataric, 94, 96], [Sian, 91], [Weiss, 93], [Shaw & Whinston, 89], [Foisel, 97], [Goldman & Rosenschein, 95], [Camps, 98],...). L'apprentissage dans les SMA est plus complexe que l'apprentissage dans les systèmes d'IA classique, car il faut prendre en compte le «*collectif*». Apprendre, dans ces systèmes, peut être vu soit comme un apprentissage du collectif, soit comme un apprentissage individuel à partir du groupe [Camps, 98], [Kabachi & al., 97].

### 4.1 Types d'apprentissage

L'apprentissage dans les systèmes multi-agents peut être particulièrement utile :

- s'il y a des agents qui doivent faire face plusieurs fois au même type de problèmes;
- si l'expérience de quelques agents peut aider les autres dans la réalisation de leurs tâches;
- dans la résolution de problèmes complexes, divisés en sous-problèmes et lorsque ceux-ci ont déjà été partiellement résolus dans le passé;
- dans les situations où le type d'organisation des interactions entre les agents est mal adapté à une classe spécifique de problèmes et où le système est amené à tester plusieurs formes possibles d'organisation (auto-organisation).

Pour Shaw et Whinston [Shaw & Whinston, 89] et Weiss [Weiss, 93], l'apprentissage en SMA est de deux types : « *two types of learning may occur : the agents can learn as a group<sup>77</sup> (distributed or collective learning), while at the the same time, each agent can also learn on its own by adjusting its views and action (centralized or isolated learning)* ».

Nous avons choisi une dichotomie d'apprentissage qui met en avant l'enrichissement des compétences<sup>78</sup>.

#### 4.1.1 Apprentissage des compétences

C'est l'apprentissage des connaissances sur le domaine, qui peut s'effectuer soit de manière :

- ⇒ *isolée et individuelle* où l'agent crée, de sa propre initiative, de nouvelles connaissances, et en ajustant ses vues ou ses actions (cf. chap. V);
- ⇒ *collective* ou *en groupe* où les agents échangent de la connaissance ou s'observent dans leurs activités respectives.

<sup>77</sup> e.g. by exchanging knowledge or by observing other agents.

<sup>78</sup> Pour rester en accord avec l'apprentissage dans la théorie de la firme et ne pas s'éloigner de notre problématique.

Dans un apprentissage individuel, on distingue également deux types d'activité d'apprentissage :

- un agent peut apprendre pour améliorer sa résolution de problème, en utilisant des heuristiques, la révision des croyances et l'utilisation de connaissances plus pertinentes.
- en observant comment les autres agents résolvent les problèmes. L'agent améliore, alors, sa capacité à résoudre un problème, soit en demandant de l'aide aux autres agents du système, soit en intégrant leurs expériences à partir d'explications.

Un apprentissage en groupe permet :

- une meilleure coordination qui peut être réalisée grâce au partage d'informations, ou un meilleur signalement (identification) entre agents.
- une meilleure efficacité d'allocation de tâches et de ressources.

Les agents, au fur et à mesure de leurs interactions, peuvent apprendre sur les autres et mettre à jour leurs compétences en conséquence.

#### 4.1.2 Apprentissage de l'organisation

Il porte sur les liens de dépendances possibles entre agents pour leur permettre de mieux se coordonner. Il s'agit d'un apprentissage collectif qui consiste à apprendre les interactions entre agents afin d'améliorer celles-ci.

Nous allons nous intéresser, dans cette thèse, essentiellement au premier type d'apprentissage (§ 4.1.1) qui permettra à nos agents (cf. chap. V) d'enrichir leurs connaissances du domaine pour une bonne prise de décision en vue d'atteindre un objectif commun. Pour cela, les travaux les plus significatifs<sup>79</sup> qui étudient ce type d'apprentissage, vont être décrits dans les paragraphes suivants.

### 4.2 Techniques et méthodes d'apprentissage des compétences

Plusieurs auteurs se sont penchés sur l'étude de l'apprentissage des compétences dans les systèmes multi-agents, Goldman et Rosenschein [Goldman & Rosenschein, 95, 96], Sen et Sekarane [Sekarane & Sen, 94], Sian [Sian, 91], Mataric [Mataric, 96], etc.. La technique d'apprentissage la plus citée et usitée par ces auteurs est la technique de *l'apprentissage par renforcement (Reinforcement Learning (RL) technique)*. Cette technique de l'IA classique a été étendue à l'IAD.

#### 4.2.1 Apprentissage par Renforcement

Dans l'apprentissage par renforcement, l'exécution d'une action produisant des résultats satisfaisants est récompensée (renforcée) ou est affaiblie dans le cas contraire. L'apprentissage est fondé sur une corrélation entre les comportements effectués et les résultats qu'il reçoit en retour (rétroaction ou feed-back). Ce processus d'apprentissage a pour objectif la maximisation à long terme de la récompense d'une action

---

<sup>79</sup> Bien sûr pour notre objet d'étude.

(maximisation de son succès espéré). Cette technique d'apprentissage permet au système une performance meilleure et robuste dans un environnement changeant et incertain [Singh Satinder, 96].

Les algorithmes les plus référencés pour ce type d'apprentissage sont : l'*algorithme Q-learning* [Watkins & al., 92], les *systèmes classifieurs* [Holland, 85], l'*algorithme du bucket brigade* [Holland, 85].

⇒ *L'algorithme Q-learning* estime à long terme la récompense pour chaque action et constitue un mécanisme récursif de choix des actions à entreprendre ainsi que de leur enchaînement. L'utilisation des agents Q-learning [Sandholm & al., 95] conduit au préférentiel des meilleures actions et à l'abandon des actions dont la perspective de succès est plus faible.

⇒ *Les systèmes classifieurs* sont des ensembles de règles<sup>80</sup>, ils apprennent en ajustant la force associée à leurs règles (appelées classifieurs) à partir d'un feed-back et en découvrant de meilleures règles en utilisant un algorithme génétique<sup>81</sup>. Comme le souligne V. Camps, ils sont essentiellement utilisés pour créer des comportements adaptatifs.

⇒ Enfin, *l'algorithme du bucket brigade* est souvent couplé aux classifieurs ; lorsqu'un agent est choisi pour être exécuté, sa force est augmentée par le feed-back environnemental. Mais avant cela, une fraction de sa force est ôtée et ajoutée à la force du classifieur qui a été exécuté dans le dernier cycle.

De nombreux modèles d'apprentissage des compétences utilisent les algorithmes cités ci-dessus, les plus significatifs seront détaillés dans les paragraphes qui suivent.

#### 4.2.2 Le modèle de Sekarane et Sen

Le modèle présenté dans Sekaran et Sen [Sekaran & Sen, 94] utilise l'algorithme du Q-learning, basé sur le schéma d'apprentissage par renforcement, et distribué dans chaque agent. Sekarane et Sen étudient un domaine non coopératif, où les agents ont des buts conflictuels. Ces agents ne partagent ni connaissance, ni résultat, et n'ont pas de modèle l'un de l'autre (ne se connaissent pas les uns les autres). Ils apprennent une stratégie à partir d'observations (le feed-back qu'ils reçoivent en provenance de leur environnement) et l'améliorent avec l'expérience<sup>82</sup>. Le mécanisme d'apprentissage est totalement asynchrone, du moment que les agents apprennent de manière totalement indépendante.

---

<sup>80</sup> Ils sont très proches des règles de productions

<sup>81</sup> Pour plus de détails et de précisions, voir [Shaw & Whinston, 89].

<sup>82</sup> Les rétroactions (feed-back) de l'environnement permettent à l'agent de guider son comportement via l'algorithme d'apprentissage.

#### 4.2.3 Le système de Sian

L'apprentissage dans le système de Sian [Sian, 91] est étudié pour que les agents améliorent leurs connaissances sur le domaine. Contrairement au modèle de Sekaran et Sen, la coopération entre les agents est le moteur de l'apprentissage. Les agents confirment ou infirment, par des interactions coopératives, des hypothèses qu'ils ont déduites. Les agents sont autonomes et ne possèdent pas une information complète sur l'environnement ; c'est pour cela, qu'ils doivent coopérer pour compléter leur information<sup>83</sup> et par là même bénéficier de l'expérience (positive ou négative) d'autres agents.

Son modèle MALE (Multi-Agent Learning Environment), représente un système auto-adaptatif destiné à la résolution de problèmes dans lesquels les agents ont une connaissance incomplète des méthodes de résolution alternatives. Ce système est constitué :

- d'agents qui apprennent incrémentalement,
- d'opérateurs qui permettent aux agents d'exprimer leurs opinions,
- d'un tableau noir pour la communication entre agents,
- d'une fonction d'évaluation des opinions individuelles,
- d'un mécanisme d'intégration de nouvelles connaissances.

Le mécanisme d'apprentissage est essentiellement basé sur l'interaction entre agents. Pour apprendre, ils échangent des opinions et des jugements de valeur sur des hypothèses. A chaque hypothèse est associée une valeur de confiance basée sur le nombre d'instances utilisées pour la générer. L'apprentissage a lieu quand tous les agents ont réussi à trouver un consensus sur l'hypothèse considérée. Il s'effectue en trois phases :

- la génération d'hypothèses initiales par un des agents.
- la coopération pour arriver à une version de ces hypothèses acceptée par tous.

Celle-ci est vue en termes de représentation des connaissances, d'évaluation d'hypothèses et d'unification de toutes les opinions reçues.

- l'intégration des informations ainsi apprises par les agents. A ce niveau, le problème de la révision des croyances se pose pour intégrer les nouvelles connaissances.

Tous les agents sont dotés d'un mécanisme d'apprentissage identique. Un agent décide du choix des hypothèses sur lesquelles va porter l'apprentissage et sollicite les autres pour apprendre. Ainsi le mécanisme d'apprentissage est distribué et garantit l'autonomie des agents.

#### 4.2.4 La méthode de Shaw et Whinston

Ils se sont intéressés à l'apprentissage des connaissances et compétences des agents cognitifs [Shaw & Whinston, 89]. Leur méthode est destinée à des sociétés d'agents, qui communiquent par envoi de messages. Ils considèrent les systèmes multi-

---

<sup>83</sup> Notons que cette information, est utile et pertinente car les agents opèrent dans un environnement similaire et identique, mais qui ne sera jamais exhaustive.

agents comme des organisations adaptatives, capables de s'enrichir en apprenant à partir d'expériences passées.

La méthode est basée sur deux processus :

⇒ *un processus d'offre de résolution de tâches (problèmes)*, qui est l'extension du réseau contractuel de Smith et Davis [Smith & al., 80]. Le processus de résolution se compose de quatre phases :

- décomposition d'une tâche en sous-tâches,
- allocation des sous-tâches aux agents,
- résolution des sous-tâches par les agents choisis, et
- intégration des solutions partielles, obtenues dans la phase précédente, pour obtenir la solution globale..

L'extension consiste à récompenser les agents sélectionnés pour résoudre une tâche au cours du processus de résolution. Cette résolution permet d'augmenter la « force » de l'agent. La force quantifie donc le service rendu par l'agent à la collectivité, elle reflète sa capacité à résoudre des tâches.

⇒ *un processus de transformation génétique* grâce aux algorithmes génétiques de mutation ou de croisement on peut remplacer les agents « faibles » par des agents « forts ». La performance du système est ainsi augmentée. Pour cela, chaque agent possède une représentation génétique de ses caractéristiques et de ses capacités. La coopération est le critère utilisé pour guider l'apprentissage au sein de ce système.

L'architecture des systèmes à base de classifieur a été appliquée de manière distribuée au sein de chacun des agents pour permettre l'apprentissage. Par contre, les algorithmes génétiques sont centralisés car ils nécessitent la connaissance des forces assignées à tous les agents du système.

Dans ce système, l'apprentissage concerne à la fois les connaissances des agents et l'organisation.

## 5 APPRENTISSAGE DANS LES ORGANISATIONS PRODUCTIVES

La question de l'apprentissage est considérée comme centrale dans la théorie économique de la firme, et une caractéristique fondamentale de l'activité économique est qu'elle fournit l'opportunité d'un apprentissage, fruit de la répétition et de l'expérimentation, permettant une innovation permanente issue de l'acte de production [Hollard, 94]. La « courbe d'expérience », qui exprime la diminution régulière du coût unitaire de production de la dernière unité produite, est l'expression la plus traditionnelle des phénomènes d'apprentissage *endogènes* dans la firme. Elle est complétée dans la théorie néoclassique par un processus *exogène* d'acquisition de connaissances qui consiste à importer dans la firme des innovations techniques provenant d'un stock externe de connaissances ou d'inventions disponibles.

Cette dichotomie<sup>84</sup> théorique entre processus endogène et exogène est toutefois fortement remise en question dans le cadre des nouvelles approches de l'acquisition de savoir par la firme. L'actuelle analyse économique de l'innovation traite davantage des processus d'exploration et d'amélioration des solutions techniques existantes, c'est-à-dire des processus effectifs d'apprentissage, dans un sens progressif et cumulatif. Cette approche, qui rejoint une rationalité procédurale [March & Simon, 74] et rappelle la démarche Kaizen<sup>85</sup>, ne considère plus le changement technologique comme le résultat d'une innovation exogène, mais comme un processus actif et permanent liant les compétences internes de la firme et l'état de son environnement.

A partir de la décomposition des connaissances selon les trois niveaux de Rasmussen, citée au chapitre I [Hoc, 87] (connaissances routinières, opératives et générales), nous pouvons distinguer trois classes d'apprentissage.

### 5.1 Apprentissage subi

Ce type d'apprentissage s'identifie au remplacement progressif des connaissances de haut niveau par des connaissances routinières, comme suite à la répétition de tâches identiques. Il mène à l'établissement de règles de décisions programmées, ou routines, et permet la diminution progressive des coûts de production.

### 5.2 Apprentissage orienté

Dans ce type d'apprentissage, l'autonomie du sujet face aux perturbations permet la remise en question des routines précédemment établies ; la sélection d'une nouvelle classe de solutions parmi un ensemble connu est orientée par l'expérience de situations comparables, et ce processus de sélection sera de plus en plus rapide au fur et à mesure de l'accumulation d'expérience. Ce qui rejoint fortement l'apprentissage (en IA) à partir de cas vu au paragraphe 3, et nous donne une raison de plus pour affirmer (par rapport à notre problématique) que le CBR est bien adapté à ce domaine.

### 5.3 Apprentissage construit

Il est utilisé lorsqu'aucune solution satisfaisante n'est connue *a priori* ; le sujet doit alors développer un processus créatif d'invention, issu d'actions productives, et d'où émergera une nouvelle classe de solutions au problème. Nous remarquons qu'il existe une certaine similitude entre ce type d'apprentissage et l'apprentissage (SMA) collectif et organisationnel vu au paragraphe 4.

⇒ **Remarque** : pourtant, si l'apprentissage organisationnel construit, au sens du processus collectif d'invention face aux problèmes nouveaux, est un déterminant des performances en environnement instable, il peut également s'opposer à l'amélioration de

---

<sup>84</sup> Par rapport à la dichotomie qui a été faite en IA (§. 2) et en IAD (§. 4).

<sup>85</sup> Kaizen : la clé de la compétitivité japonaise. M. Imai. Eyrolles, 1992. P. 27.

l'efficacité conçue dans un sens plus statique mais toujours nécessaire. En effet, le principe du remplacement, selon un processus d'apprentissage subi, de connaissances de haut niveau par des connaissances routinières s'accommode mal de l'invention permanente de méthodes nouvelles, car cette innovation empêche l'accumulation d'expériences analogues. En d'autres termes, il y a opposition entre flexibilité dynamique et apprentissage construit d'un côté, et productivité statique et apprentissage subi de l'autre. La première renvoie à l'amélioration des performances, tandis que la seconde renvoie à une dynamique d'aptitude définie comme la capacité d'une entreprise à créer de nouvelles ressources et à se doter de nouvelles compétences à long terme. Ces deux sphères se superposent donc continuellement, et le dosage entre apprentissage subi et apprentissage construit est un déterminant cognitif fondamental des performances de l'entreprise [Kabachi & al., 97].

## 6 DISCUSSION

L'un des objectifs de ce travail de recherche (voir introduction générale) est de modéliser les processus décisionnels des organisations productives, et l'enrichissement des compétences des acteurs décisionnels pour de bonnes prises de décision dans les meilleurs délais. Pour répondre à cette problématique et atteindre nos objectifs, nous avons opté pour un système d'apprentissage à partir de cas adaptés aux systèmes multi-agents, c'est-à-dire un apprentissage individuel (basé sur le CBR) à partir du groupe (basé sur les interactions entre agents).

L'intérêt majeur du raisonnement à partir de cas, d'une part, réside dans sa capacité à résoudre des problèmes à partir d'anciennes solutions, sans devoir recommencer le processus de construction de solutions dès le début. Il s'avère plus facile de transformer des solutions anciennes que d'en construire de nouvelles [Leake, 96]. Les humains confrontés à des situations nouvelles réagissent, naturellement par référence à des cas connus proches. Comme le souligne J-C Pomerol [Pomerol, 94], les décideurs, en général raisonnent par analogie. Pour la modélisation de ce processus de décision, le raisonnement à partir de cas est un moyen d'aborder et de répondre à cette problématique. Cette approche est particulièrement intéressante dans la mesure où elle tend à se présenter comme « proche » du fonctionnement cognitif humain.

D'autre part, l'utilisation de cas analogues est de loin plus importante que celle de principes abstraits, de règles dans des situations naturelles. En effet, les cas sont en général de nature opérationnelle, ils décrivent des actions en étroite liaison avec leurs contextes [Kolodner, 93]. Ceci les oppose aux règles, telles que celles employées dans des systèmes à base de règles.

D'une manière générale, le CBR présente de nombreux avantages pour la conception des systèmes à base de connaissance [Mignot, 94]:

- le CBR peut s'appliquer à des domaines ne disposant que d'une théorie incomplète et/ou inconsistante, contrairement à l'approche par règles. Cela offre un large champ d'application possible pour le CBR car tous ces domaines, du fait de leur manque de modèle causal, ne pouvaient être expertisés à l'aide de systèmes à base de règles.
- les systèmes de CBR sont robustes aux informations manquantes, bruitées ou relativement imprévues. La remémoration par similarité permet de ne pas disposer de

toute l'information dans la description de la nouvelle situation. La ressemblance n'a pas besoin d'être totale pour retrouver les cas intéressants.

- il permet à l'utilisateur d'avoir rapidement des solutions aux problèmes. Le fait de se ramener à un cas déjà traité permet de ne pas avoir à ré-exécuter, à partir de zéro, des traitements et des inférences pour parvenir à des solutions. Le système Casey [Koton, 88] a montré un gain de temps de l'ordre de deux si l'on peut réutiliser une expérience antérieure.
- il propose à l'utilisateur des moyens d'évaluer des solutions quand aucune méthode algorithmique n'est disponible pour l'évaluation.
- les cas sont des structures modulaires, et leur accumulation permet de couvrir facilement un domaine d'expertise.
- les cas sont utiles pour interpréter des concepts ouverts et mal définis.
- les cas aident l'utilisateur à concentrer son raisonnement sur les paramètres importants et essentiels d'un problème.
- se rappeler des expériences précédentes est utile particulièrement pour éviter de répéter des erreurs commises dans le passé.

En plus des avantages cités plus haut, nous avons choisi le CBR essentiellement, car il comporte des capacités d'apprentissage qui permettent :

- d'accroître leur puissance en apprenant des raccourcis (apprentissage d'un nouveau cas)
- d'augmenter de façon incrémentale (et donc mieux contrôlable) son expertise sur le domaine de la gestion de production
- d'anticiper et de prévenir les erreurs.

Parmi les problèmes liés à cette approche, on cite :


- les systèmes de raisonnement à partir de cas qui pourraient être tentés d'utiliser un cas de la base aveuglément, sans le valider dans la nouvelle situation.
- l'apprentissage de la nouvelle situation, avec sa solution inférée, doit être contrôlé, pour ne pas introduire de cas inutiles (qui ralentissent la remémoration sans augmenter l'expertise) ou dangereux (leur description est trop générale alors que se sont des exceptions, c'est le problème d'utilité).
- ces systèmes peuvent être considérés comme des systèmes peu créatifs. Ils utilisent les mêmes cas et disposent de capacités limitées pour créer des solutions nouvelles (limitées par les techniques d'adaptation qu'ils utilisent).
- la base de cas induit un biais de raisonnement qui peut conduire à générer des solutions non-optimales.

Suite à ces inconvénients, liés au système CBR, nous allons essayer de les combler et ainsi améliorer la performance du système, par l'utilisation d'un système au sein duquel deux approches s'associent pour donner de meilleures solutions à des problèmes (apprentissage à partir du CBR + apprentissage à partir d'interaction) (cf. chap. V).





## PARTIE 2 : MAC1 ET MAC2



Cette deuxième partie, composée des chapitre IV et V, présente nos propositions de modèles pour répondre à notre problématique, à savoir les Modèles d'Agents Cognitifs *MAC1* et *MAC2*.

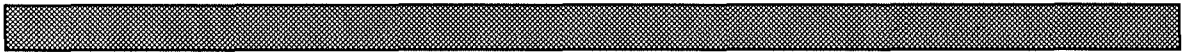
⇒ le chapitre IV présente un modèle d'une société d'agents MAC1 qui va s'intégrer au modèle d'organisation productive, puis décrit les comportements associés à cette société d'agents tels que la communication, la coopération, la négociation, l'organisation, etc..

⇒ le chapitre V est consacré à présenter le fonctionnement de MAC2 qui n'est autre que le modèle d'agents MAC1 auquel nous associons un module d'apprentissage. Notre objectif est d'assurer la réutilisation de la connaissance décisionnelle pour la prise de nouvelles décisions dans des contextes ou des situations analogues.



## CHAPITRE IV

### MODELE D'AGENTS COGNITIFS : MAC1



*A partir du modèle systémique de compréhension (chapitre I) et des concepts informatiques qui permettent de passer d'un modèle conceptuel à un modèle informatique d'implémentation (chapitre II), nous allons proposer dans ce chapitre une société d'agents qui va s'intégrer au modèle **META2** et transformer la notion théorique de « Centre de Décision », en un mécanisme cognitif de raisonnement, l'« Agent Cognitif », puis décrire les comportements associés à cette société d'agents.*



# 1 INTRODUCTION

## Du modèle META2 au modèle MAC1

A travers le modèle systémique de compréhension, décrit au chapitre I, nous avons identifié et formalisé les différentes composantes des organisations productives. L'intérêt principal de ce modèle est de faire apparaître de manière explicite les centres de décision à différents niveaux des organisations productives (distribution de la décision). La description de ces centres a permis de représenter les phénomènes d'orientation et les mécanismes de prise de décision.

Notre objectif, à présent, est de prendre en compte les interactions possibles entre ces centres de décision, de formaliser leurs connaissances, et leurs mécanismes d'apprentissage.

Les centres de décision représentent des modules autonomes dans lesquels les mécanismes décisionnels sont décrits<sup>86</sup> ; ils orientent le fonctionnement des centres d'activités auxquels ils sont rattachés, en leur transmettant des décisions et des rationalités qui résultent de leur système inférent (raisonnement) à partir des rationalités, des constats (informations perçues), des intentions, et des compétences (connaissances du domaine) (cf. fig. IV.1)

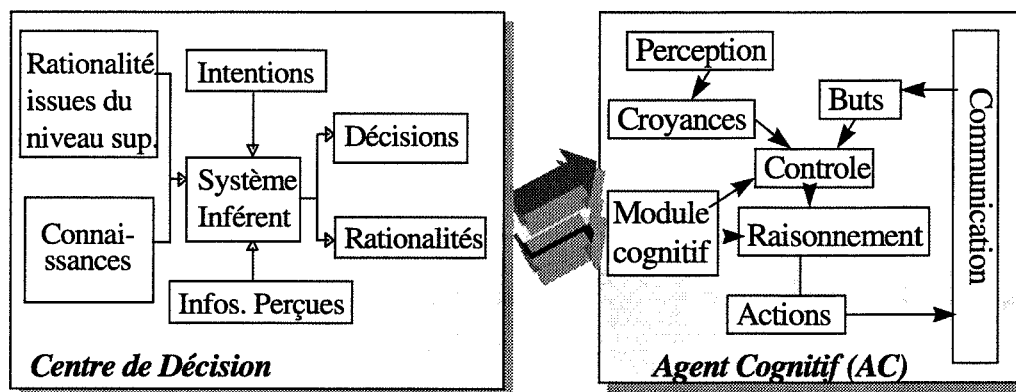


Figure IV. 1 : Du Centre de Décision à l'Agent Cognitif

A partir de cette description des centres de décision, nous proposons d'approfondir l'homomorphisme qui existe entre ces centres et le concept d'agents cognitifs. Nous passons ainsi d'une définition conceptuelle d'un centre de décision à une spécification informatique sous la forme d'agent cognitif<sup>87</sup> (fig. IV. 1), résultant des travaux en IAD (chap. II).

Dans une première partie, nous proposons une architecture fonctionnelle pour l'agent représentant le centre de décision. Ensuite nous définirons la société d'agents qui va s'intégrer au modèle systémique Méta2 (chap. I), dans laquelle les agents vont décrire les comportements associés à cette société ainsi que les différentes interactions.

<sup>86</sup> Description faite par van Gigch [Van Gigch, 91], voir chap. I.

<sup>87</sup> Description classique d'un agent cognitif.



Dans notre modèle, un agent possède trois types de connaissances<sup>89</sup>. Les **connaissances du domaine** représentent l'expertise de l'agent sur son domaine d'activité (ex. compétences). Les **connaissances de contrôle** (intention, rationalités, décision, croyances) permettant à l'agent de déterminer les actions à effectuer et de générer les décisions et les rationalités en direction des centres d'activités (directives). Avec les **connaissances de communication** (ex. accointances, messages..) l'agent interagit et coopère avec les autres agents.

Il faut noter que le type de connaissance est différent d'un agent à un autre suivant le niveau, exemple : *au niveau stratégique, la connaissance est généralement sous forme d'heuristiques ; au niveau chaîne d'activité, la connaissance est plutôt sous forme d'algorithmes etc...*.

### 2.1.1 Connaissances du domaine

C'est dans cette partie que vont se retrouver les compétences liées à la spécialité de l'agent (cf. fig. IV. 3). Cette matière grise, ce savoir-faire propre, qui représentent les règles de fonctionnement de l'entreprise, sera enrichi par le biais de l'apprentissage<sup>90</sup>. Ce type de connaissance se décompose en :

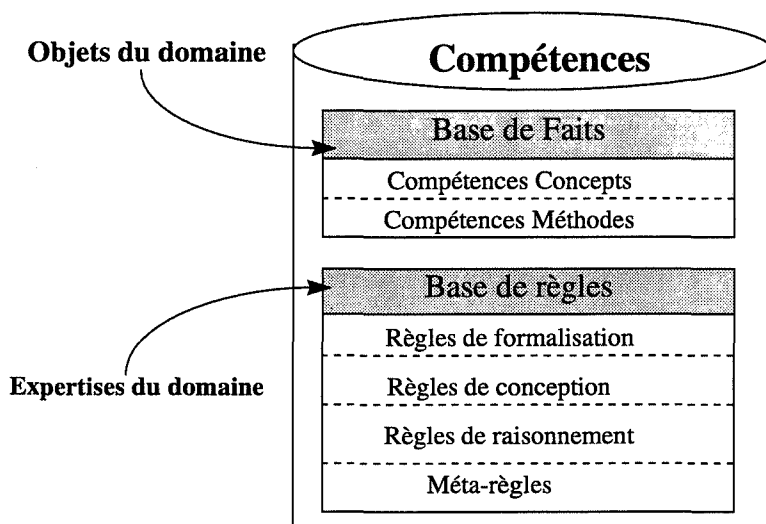


Figure IV. 3 : Connaissances du domaine

#### 2.1.1.1 Objets du domaine

Les objets du domaine, sont tout simplement des faits (en terme de compétences), et sont de deux types :

<sup>89</sup> Pour la modélisation de la connaissance, nous nous sommes inspirés des travaux de C. Iffenecker [Iffenecker, 92] sur le système CONDOR. Ce système informatique basé sur un modèle multi-agents permet de représenter les connaissances et les activités des experts participant au développement de produits électromécaniques. Le système permet la capitalisation du savoir-faire de tous les experts impliqués dans le développement de ces produits.

<sup>90</sup> C'est ce qui va faire l'objet du chapitre V.



**Compétences Concepts :** sont les idées directrices sur lesquelles s'appuie l'agent pour déclencher les compétences méthodes.

Exemple : - *Le délai de livraison aux clients ne doit pas dépasser trois jours.*

**Compétences Méthodes :** il s'agit de connaissances sur les méthodes, heuristiques ou paramétrage que peut avoir tout individu impliqué dans un processus de production.

Exemple : - *Le stock de sécurité doit être égal au moins à 10% de la commande clients.*

### 2.1.1.2 Expertises du domaine

Ce sont les connaissances (règles, etc..) utilisées par l'agent pour aboutir à une solution en vue de résoudre un problème. Elles sont de trois types (fig. IV. 3) :

**Règles de formalisation,** sur lesquelles va s'appuyer le module de formalisation pour déterminer la tâche à réaliser.

Exemple : - *Si le contenu du message transmis par le module de communication est une directive du niveau supérieur, alors la tâche à réaliser est décliner une directive pour le niveau inférieur.*

**Règles de conception** qui permettent à l'agent d'inférer des actions possibles.

Exemple : - *Si l'agent a pour intention de pérenniser sa clientèle et une croyance sur le fait que la concurrence respecte ses délais à 70% alors le taux de respect des délais propre devra dépasser les 70%.*

**Règles de raisonnement,** qui permettent à l'agent à la fois de choisir une action parmi celles transmises par le module de conception, et de déterminer le destinataire de cette action (voir chap. VI).

**Méta-règles,** sont des règles qui choisissent les pacqués de règles à activer suivant la tâche à réaliser (directive, réponse à une requête, etc..).

### 2.1.2 Connaissances de contrôle

Ces connaissances permettent à l'agent d'exercer deux types de contrôle :

⇒ **sur soi**, l'agent peut observer son propre comportement, et connaître ses objectifs propres (*intentions*), ses *croyances* sur l'état du système, les *rationalités* et *décisions* transmises depuis le niveau supérieur, qui guideront son comportement dans la prise de décision.

⇒ **sur son environnement**, il gère et pilote le centre d'activité auquel il est relié par le biais d'*engagements* (cf. § 2.2.2).

Nous allons maintenant détailler ces connaissances de contrôle.

### 2.1.2.1 Rationalités et décisions

Les rationalités et les décisions, provenant du niveau supérieur (voir chapitre I, architecture de Méta2<sup>91</sup>), orientent la prise de décision et les rationalités (comportement) de l'agent. Dans les chapitres suivants, nous allons plutôt parler de notion de directive (rationalités + décisions).

Comme nous l'avons déjà évoqué au chapitre I, des quatre rationalités de J. P. van Gigch, nous n'avons conservé que les rationalités structurelle et évaluative qui renvoient à la structure de la prise de décision et aux objectifs des décideurs.

Par exemple, dans notre représentation, l'agent du processus stratégique (niveau projet) est habilité à prendre des décisions pour restructurer les processus opérationnels de traitement d'informations et de transformation physique. La rationalité évaluative est l'objectif qu'il fixe aux agents. Celle-ci est assimilable à un indicateur de performance. Bien entendu le problème essentiel réside dans la cohérence de ces indicateurs qui ne doivent pas constituer une mosaïque de logiques locales, mais un système collectif de logiques partielles traduisant une stratégie globale [Lorino, 91b]. La rationalité structurelle détermine le cadre dans lequel les agents pourront inscrire leurs propres rationalités et décisions.

Exemple : - *Je n'envisage pas de modifier le processus physique<sup>92</sup>, je pense nécessaire de construire des lignes par produit, etc..*

Dans le cas où les rationalités et les décisions du niveau supérieur ne sont pas émises, les agents du niveau inférieur adoptent trois types de fonctionnement :

1. Appliquer par défaut l'ancien fonctionnement (dernières rationalités et décisions),
2. Faire appel à ses connaissances du domaine,
3. Appliquer un mode de fonctionnement obtenu par le biais de la communication ; en d'autres termes, ce fonctionnement est le fruit d'interactions avec les autres agents.

Les décisions du plus haut niveau sont de type structurel (mode de gestion).

Exemple : *Mise en place du Kanban,*

Contrairement à celles du plus bas niveau qui sont de type quantitatif.

Exemple : *Taille de lot, fréquence et quantité de pièces à produire.*

Les décisions qui sont prises à chaque niveau sont transformées en contraintes (autres décisions) sur les rationalités pour le niveau suivant, exemple : *le choix d'un lot qui va être passé en priorité.*

### 2.1.2.2 Intentions

Une intention est la déclaration explicite des objectifs individuels. Elle exprime donc la volonté consciente d'un agent d'atteindre un but ou d'effectuer un acte.

---

<sup>91</sup> Modèle d'organisation productive à trois niveaux.

<sup>92</sup> Cf. chapitre VII (description des scénarios) et annexe A (détails des scénarios)

Par exemple, au niveau du processus stratégique, l'intention d'un manager peut être d'être *leader sur le marché européen*, et au niveau d'un processus opérationnel, elle peut être de *respecter sa rationalité évaluative*.

Les intentions de l'agent stratégique seront simplement de satisfaire sa rationalité évaluative propre (objectif), tout en restant dans le cadre des possibilités de décision données par sa rationalité structurelle, qui sont liées aux contraintes de l'environnement socio-économique de l'entreprise. Nous avons envisagé pour les autres agents cognitifs (du niveau processus et chaîne d'activité) la possibilité d'avoir à choisir par exemple une de ces intentions : *satisfaire ou non la rationalité évaluative du niveau supérieur, faire du zèle*. Enfin, nous analyserons, dans le chapitre VII, les dysfonctionnements qui en résultent.

### 2.1.2.3 Les informations perçues

La fonction « perception » (cf. fig. IV. 2) sera chargée périodiquement de récupérer l'état du système (au moment d'une prise de décision par exemple). Les informations perçues via le module de perception sont des connaissances qui évoluent tout au long du processus de fonctionnement du système.

Exemple : *Concurrent a baissé le prix d'une valeur x, taux d'utilisation d'une ressource (machine, outil, etc..), état des stocks, temps de changement d'outil est faible, machine goulot est M1.*

Une copie de cette information perçue sera archivée dans le module « informations perçues » pour une éventuelle utilisation ultérieure (en réalité c'est la référence à cette information), et une autre sera transmise au module « croyances » pour une mise à jour périodique.

Tout état<sup>93</sup> qui ne peut être perçu par l'agent, pourra lui être communiqué par ses accointances, et donc permettre aussi une mise-à-jour de la base de « croyances ».

### 2.1.2.4 Croyances

Une croyance désigne une information qui fait partie de l'univers d'un agent<sup>94</sup>, que cette information soit vraie ou non. J. Ferber [Ferber, 95] souligne qu'il n'existe pas de « faits » en tant que tels, seulement des croyances qui n'ont pas été encore réfutées. Pour nous une croyance est la représentation de l'état du système à un instant donné. C'est à dire la description plus ou moins complète du système à un instant donné.

Notons que, toute information qui fait l'objet d'une croyance peut être remise en question en fonction de l'évolution du système. Soit dans le cadre de la perception, soit dans le cadre de la communication

<sup>93</sup> Ensemble de faits caractérisant le système à un instant donné.

<sup>94</sup> Les croyances ne sont pas universelles, elles sont relatives à un individu, un groupe, une société [Ferber, 95].

- Exemples : - *Je n'ai pas rencontré M<sup>r</sup> Dupont pendant la pause, je crois qu'il est malade.*  
- *Je n'ai pas vu arriver le livreur je crois que nous aurons des problèmes d'approvisionnement en matières premières.*  
- *L'opérateur fraisage communique à l'opérateur assemblage l'état de son stock.*

#### 2.1.2.5 Engagements

Un engagement est l'affirmation d'une croyance de la réalisation d'un but ou de l'exécution d'une action [Bouron, 92]. Les engagements sont des structures absolument indispensables pour le travail collectif dans une organisation productive. Ils assurent une certaine stabilité, en apportant aux agents une certaine confiance sur le comportement des autres agents et une représentation stable de l'environnement.

En s'inspirant des travaux de J. Ferber, cités au chapitre II, nous avons défini l'engagement de notre agent comme moteur de l'action. Ainsi la prise de décision de nos agents entraîne d'une part des engagements de forme relationnelle (engagement envers autrui d'accomplir une action), d'autre part, des engagements envers soi-même, exemple : *demande une information*

#### 2.1.3 Les connaissances de communication

L'aspect communication est fondamental dans un système multi-agents. Pour s'intégrer à une population d'agents, il faut qu'un agent ait des objets de communication, ainsi qu'une expertise.

##### 2.1.3.1 Objets de communication

Les objets de communication sont les *messages* et les *accointances*.

① **Les Messages** représentent explicitement les informations et connaissances qui circulent entre agents. Leur format permet d'établir un langage commun à tous appelé protocole de communication. Il y a deux grandes classes de messages qui vont transiter par notre système :

⇒ la première concerne la transmission des directives (décisions + rationalités) aux centres d'activités et aux agents de niveaux inférieurs. Ce type de communication se limite au passage d'un certain nombre de données, et de mode de gestion (« *quantité à produire* », « *taille de lot* », « *stocks de sécurité* », « *périodicité de calcul des besoins* », « *passer de la méthode MRP à la méthode Kanban* », etc..).

⇒ la seconde concerne les communications entre un agent et ses accointances. Par l'intermédiaire de ces messages les agents s'échangent de l'information, font des requêtes ou y répondent.

② **Les accointances** sont les données et les connaissances sur les autres agents avec lesquels l'agent est en relation. Ces données sont les noms des agents, leur état (disponibilité), leurs compétences (ex. ce qu'ils savent faire) et le type de lien existant (hiérarchique, ..), etc.. Ces connaissances sont par exemple : *l'opérateur Martin détient la compétence sur le fraisage, Dupond travaille à temps partiel, Ben est le responsable de Mathieu, etc.*

### 2.1.3.2 Expertises de communication

Avec ces connaissances, l'agent va pouvoir réagir aux sollicitations de ses accointances, ainsi il doit posséder des connaissances d'interprétation (suivant la nature de messages) de création (vérification des accointances), ou d'envoi de messages (voir § 2.2.3).

## 2.2 Fonctionnalités d'un agent

### 2.2.1 Module de Perception

La perception concerne la mise en oeuvre des mécanismes permettant l'acquisition, par un agent, de connaissances sur l'environnement dans lequel il évolue (état des chaînes d'activité auxquelles il est rattaché, indicateurs de performances, etc..).

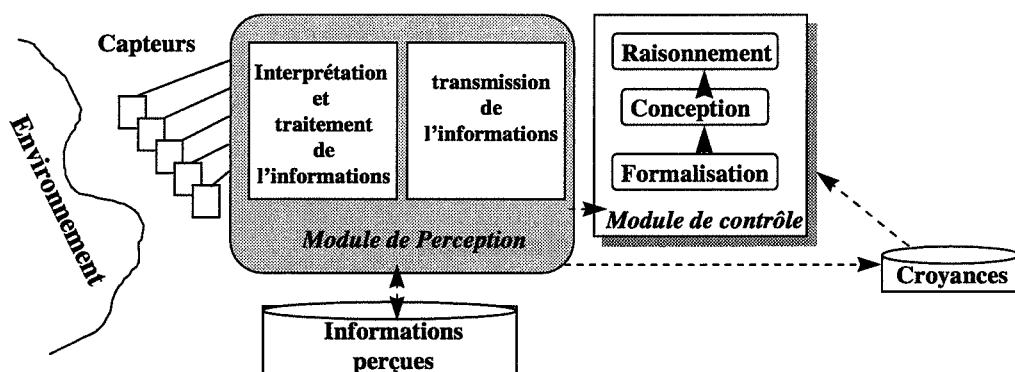


Figure IV. 4 : Module de Perception

Périodiquement, pour une prise de décision, ou pendant une situation imprévue (de panne de machines par exemple), l'agent, par le biais de ce module et des « capteurs », scrute le système d'information ou la mémoire partagée de l'entreprise, la traite, puis la transmet au module de « contrôle », et au module « croyances » pour une mise-à-jour (fig. IV. 4). La fonction principale de ce module est donc de gérer les interactions entre l'agent et son environnement.

L'agent cognitif n'a accès qu'à une certaine partie du système d'information : selon le processus auquel il est rattaché, les informations nécessaires seront ciblées. Exemple : l'agent surveille son centre d'activité, et par le biais de son module de perception, il guette les situations de blocage (manque de produits, de ressources, panne, etc..) et prend ainsi des décisions en temps réel.

### 2.2.2 Prise d'engagement

La principale fonction des agents est le pilotage et le management des centres d'activités auxquels ils sont rattachés et ceci en prenant des engagements soit de type relationnel c'est à dire prise de directives (décisions et rationalités), réponses à des requêtes, soit envers soi-même (demande d'informations pour s'enrichir en terme de connaissances).

Le processus de prise d'engagement (fig. IV. 5) passe par trois étapes, conformément aux travaux de Simon sur le processus de prise de décision (cf. chap. I, § 4.2) :

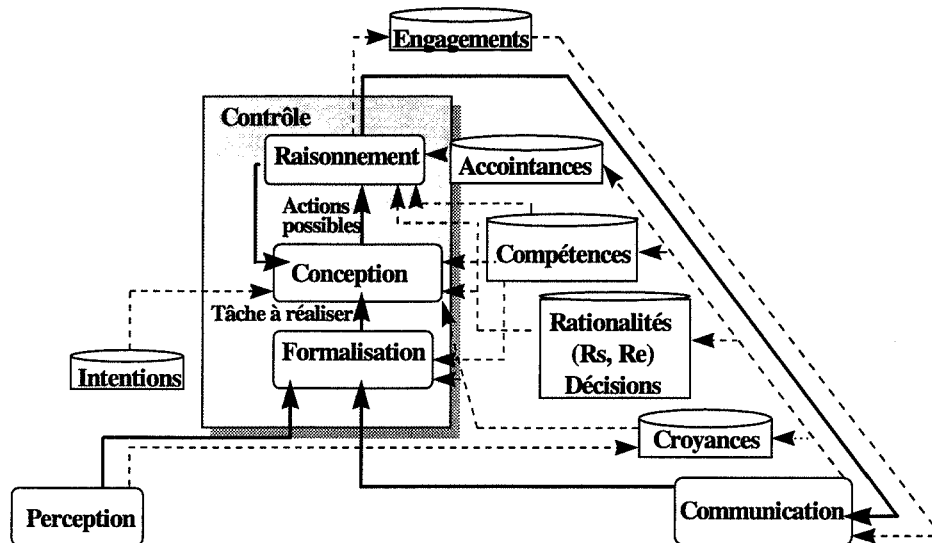


Figure IV. 5 : Module de Prise d'engagement

⇒ l'étape de formalisation (fig. IV. 6) permet à l'agent de déterminer la tâche à réaliser (prise de directives, réponse à une requête, etc.) en s'appuyant sur les règles de formalisation (cf. § 2.1.1.2), ses observations (croyances), et ses interactions avec les autres agents (messages reçus). Cette étape correspond à la première phase (*intelligence*) de H. Simon. Exemple de règles de formalisation : *Si message.nature<sup>95</sup> = requête Alors tâche = générer\_réponse, etc..*

#### Module Formalisation

##### Début

- Attendre événement (module de perception) ou message (module de communication).
- Lire les données de l'événement ou contenu du message.
- Déterminer la tâche à réaliser, en activant les règles (module compétences) et en tenant compte des croyances.
- Transmettre les résultats au module conception : tâche à réaliser.

##### Fin

Figure IV. 6 : Algorithme de Formalisation

<sup>95</sup> Voir la structure d'un message figure IV. 15

⇒ Pendant l'étape de conception (*design*) (fig. IV. 7), pour construire ses actions, l'agent fait appel à son intention propre, à ses croyances, à des rationalités et décision de l'agent du niveau supérieur (connaissances de contrôle) dans le cas d'une directive, et surtout à ses compétences (objets et règles de conception). Cette étape va être enrichie dans MAC2 (chap. V) en fonction de la tâche à réaliser.

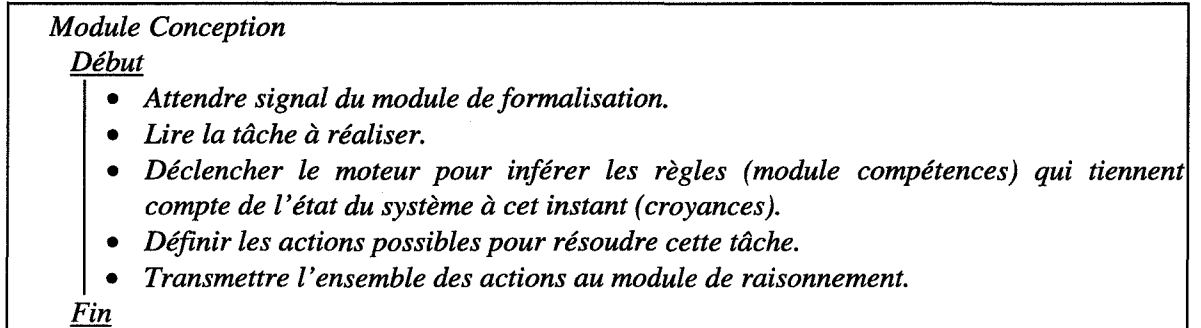


Figure IV. 7 : Algorithme de Conception

⇒ Enfin, en fonction de l'engagement à prendre, l'agent cognitif va raisonner sur ses compétences (règles de raisonnement et méta-règles qui permettent une représentation déclarative du raisonnement) et ses accointances pour ne choisir qu'une action, parmi celles qui ont été définies dans la phase de conception (fig. IV. 8).

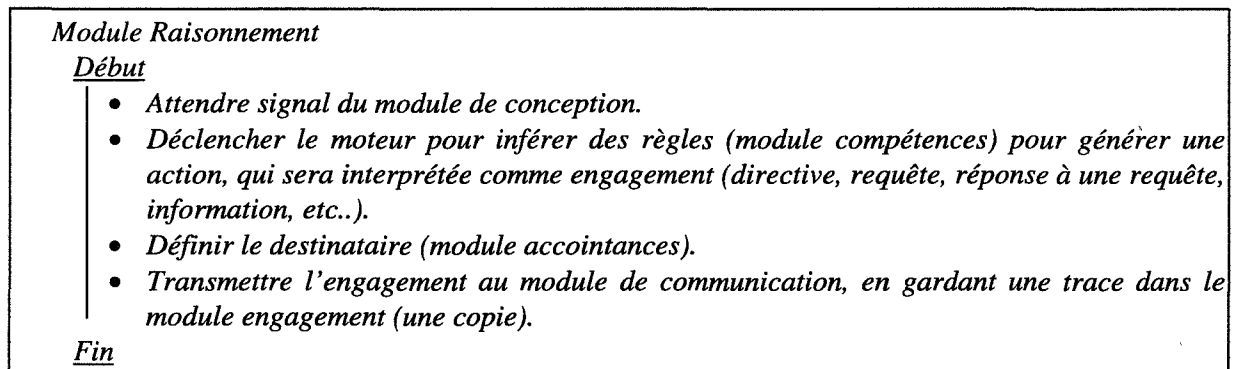


Figure IV. 8 : Algorithme de Raisonnement

Chaque phase de prise d'engagement est elle-même un processus décisionnel compliqué. Par exemple, la phase de raisonnement peut exiger d'autres activités de renseignement; donc il y a un feed back (retour arrière) vers la phase de conception, et si nécessaire communication avec d'autres agents pour un complément d'information.

Une fois l'engagement pris par l'agent, il sera transmis au module « communication » qui, à son tour, va l'expédier au destinataire (accointances de l'agent).

### 2.2.3 Communication

Ce module (fig. IV. 9) fournit les mécanismes d'interactions de l'agent avec ses accointances, et avec les centres d'activités . Ce module se charge :

- de recevoir des messages, en provenance des autres agents, par le biais de sa boîte aux lettres, qui est scrutée périodiquement.

- de les interpréter en déterminant leur nature (directive, etc..), et en les classant en fonction de leur type (urgent, prioritaire, normal, etc..)
- de mettre à jour les modules de croyances, de rationalités et décisions, de compétences, et d'acointances.
- et d'envoyer les messages aux destinataires déterminés par le processus de prise d'engagement, agent ou centre d'activité<sup>96</sup>.

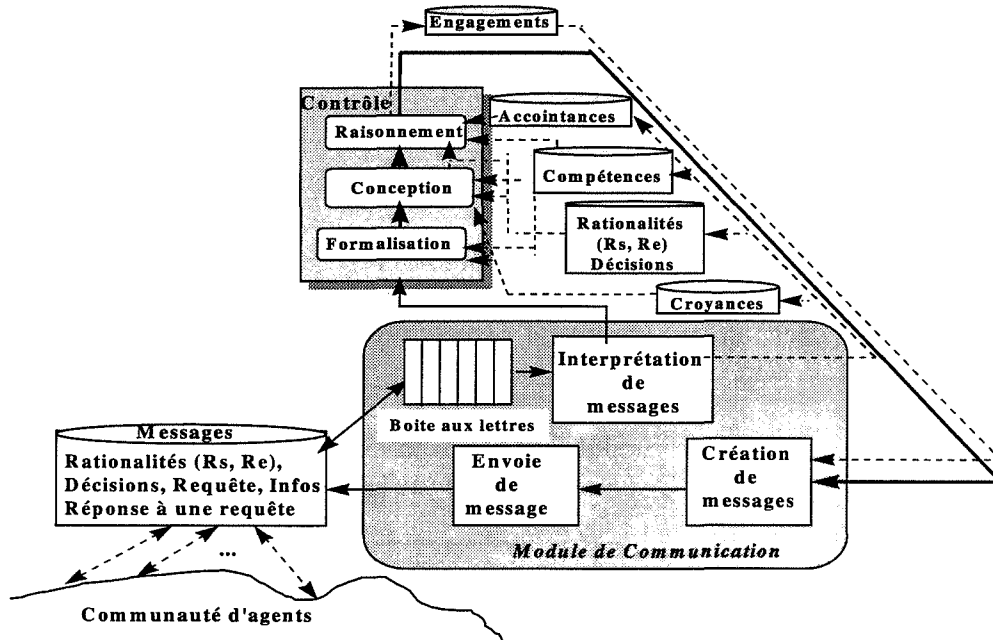


Figure IV. 9 : Module de Communication

Ce module contient des connaissances de communication, plus exactement l'expertise de communication (cf. § 2.1.3.2), qui lui permettent d'interpréter, de créer et d'envoyer les messages. Exemple de création et d'envoi d'un message (fig. IV. 10) :

↪ *Création d'un message*

*Si engagement = directive Alors*

- lire la valeur de la décision
- lire la valeur de la rationalité évaluative
- lire la valeur de la rationalité structurelle
- lire le destinataire
- créer l'objet message.

*Si engagement = requête Alors.....*

*Si engagement = ..... Alors.....*

↪ *Envoi du message*

- lire le champ destinataire (agent, centre d'activité)
- mettre dans la boîte aux lettres du destinataire le message en question.

Figure IV. 10 : Exemple de création et d'envoi d'un message

<sup>96</sup> Il faut noter que l'engagement de type « directive » envoyé au centre d'activité ne contient que la valeur décision, car les rationalités ne concernent que les agents.



Il sert donc d'interface entre l'agent et ses accointances et de canal d'interprétation et de transmission des messages.

### 2.3 Cycle d'un agent

Les agents ont pour mission principale l'organisation et la gestion du fonctionnement de l'entreprise. Cela passe par des concertations, des négociations avec les autres agents, et par la gestion des centres d'activités en fonction d'intentions propres, de rationalités et de compétences.

Le cycle de fonctionnement (fig. IV. 11) est identique pour tous les agents de la société. Il est initié soit :

- par la perception d'événements importants (fig. IV. 12.a);
- par l'arrivée de messages, quelle que soit leur nature : une directive (rationalités et décision) provenant du niveau supérieur, une requête, une information importante (fig. IV. 12.b).

Une fois l'agent activé, le module de contrôle est déclenché partant de la phase de formalisation jusqu'au raisonnement, passant par la conception.

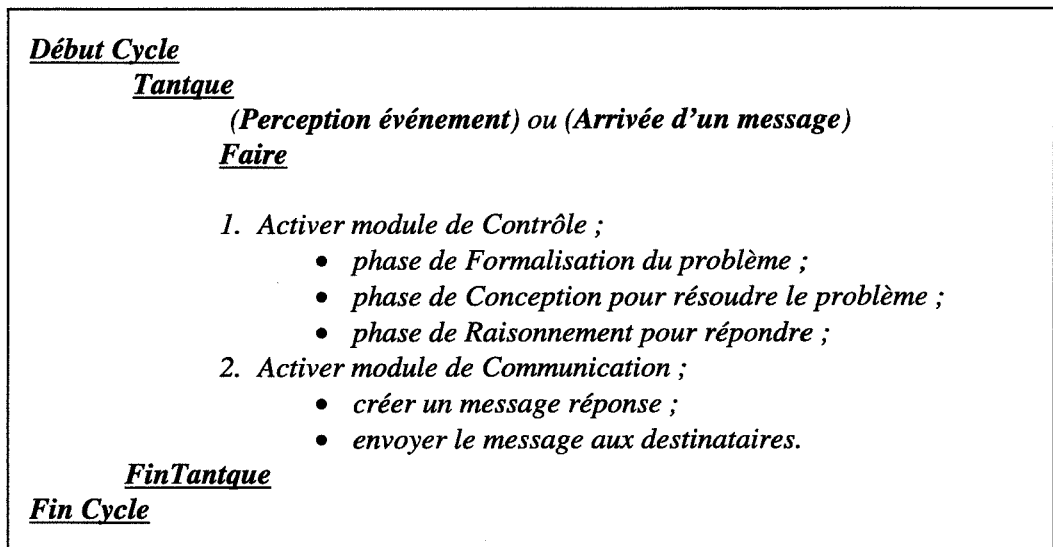


Figure IV. 11 : Algorithme de fonctionnement d'un agent

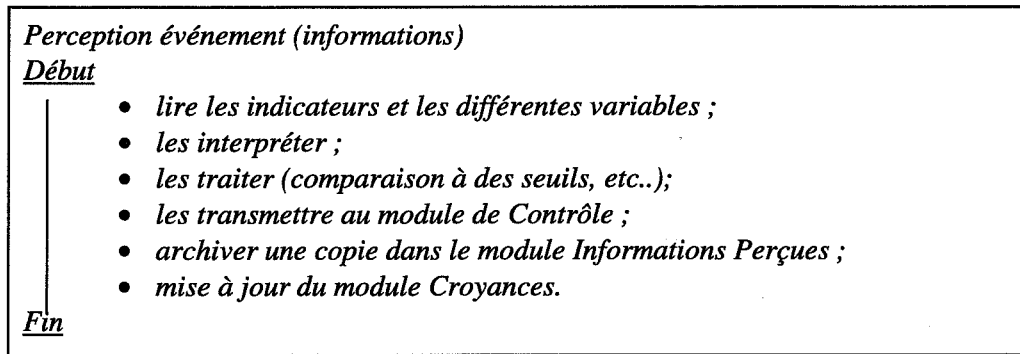


Figure IV. 12.a : Algorithme de perception d'événement

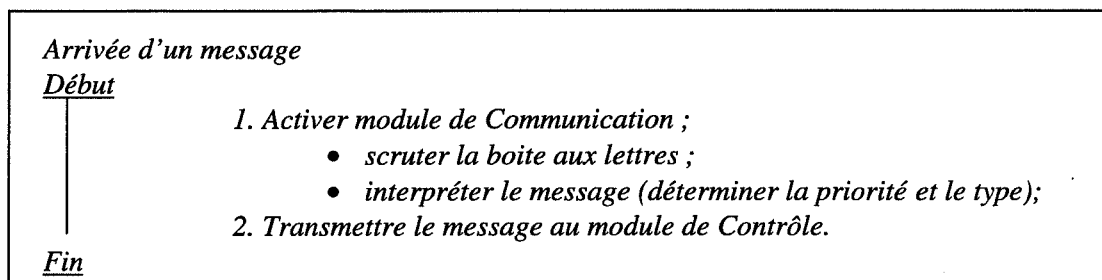


Figure IV. 12.b : Algorithme de traitement préliminaire d'un nouveau message

Après avoir défini la structure d'un agent, nous allons maintenant décrire la société d'agents ou le modèle MAC1, dans lequel l'agent évolue, tout en mettant l'accent sur les aspects fondamentaux des SMA : organisation, interaction et communication, coopération, négociation et résolution de conflits entre agents.

### 3 SOCIÉTÉ D'AGENTS

L'IAD fournit des modèles distribués pour représenter l'activité des agents ainsi que les règles de fonctionnement. Dans ces modèles, les connaissances, les méthodes, les règles, et la décision sont **distribuées** à différents modules autonomes et interactifs (les agents) capables de **communiquer** entre eux par envoi de messages. Ces agents ont des connaissances limitées à leurs domaines de compétence, une vue restreinte du problème à résoudre, mais ils sont capables de **coopérer** pour avancer dans la recherche de solutions. Cette population d'agents (société) va reproduire le comportement social des personnes qui interviennent dans la mise en oeuvre des processus de production (aussi bien en terme de décisions que d'actions).

Nous allons construire maintenant le système MAC1, en spécifiant en premier l'organisation mise en place.

### 3.1 Organisation

La société existe uniquement parce que les agents qui la constituent sont organisés. Par rapport au cadre des systèmes de production, et à la nouvelle vision de l'entreprise présentée dans le modèle Méta2 (chap. I), nous avons identifié trois types d'organisation (fig. IV. 13), conformes aux structures d'organisations humaines<sup>97</sup>. Ces trois structures sont : une structure horizontale dans laquelle tous les agents sont au même niveau, une structure verticale où les agents sont hiérarchisés, et une structure de type « effet de groupe ». Ce choix dépend aussi de la tâche (rôle) à accomplir par les agents, et de leurs engagements.

#### 3.1.1 Structure organisationnelle verticale

Cette structure traduit le mode habituel de délégation des responsabilités dans les organisations humaines, elle définit un certain nombre de niveaux par lesquels un ensemble d'objectifs et de décisions est décliné.

Dans cette structure, un agent de niveau inférieur peut être relié par des liens hiérarchiques de contrôle avec un agent de niveau supérieur qui délègue des tâches aux agents qui lui sont subordonnés selon un objectif de répartition du problème à résoudre. L'agent de niveau supérieur agit alors comme un contrôleur qui assure la coordination des agents. Il guide leurs comportements et oriente leurs prises de décisions en cohérence avec le degré d'autonomie dont peuvent bénéficier les agents. Ainsi, ce type de structure reste plus ou moins compatible avec la nouvelle vision de l'entreprise basée sur les concepts de projets, de processus, etc..

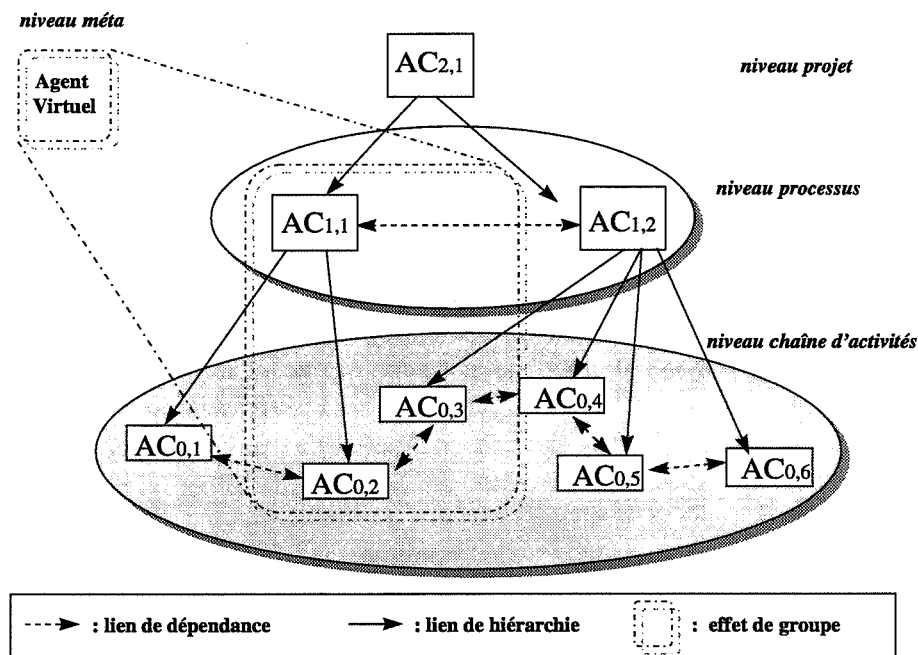


Figure IV. 13 : Structures organisationnelles

<sup>97</sup> Les structures d'organisations humaines s'étalent sur un continuum allant de la stricte hiérarchie à l'hétéarchie.

### 3.1.2 Structure organisationnelle horizontale

La structure organisationnelle horizontale se superpose à la structure verticale. Dans cette structure, on considère que tous les agents sont de même niveau : il n'y a pas d'agents maîtres et d'agents esclaves. Cette structure permet aux agents la synchronisation et la coordination de leurs actions. Nous rencontrons par exemple ce type de structure dans des groupements d'entreprises coopératives [Vincent & al., 98], dans lesquels chaque entreprise conserve son autonomie, dans les organisations par projet voire dans les entreprises structurées par flux de produit.

### 3.1.3 Structure organisationnelle de type « Effet de Groupe »

Cette structure représente la notion d'équipe ou de groupe de réflexion (fig. IV. 13). Elle est plus conforme à la vision d'organisation productive moderne et performante que la structure hiérarchique. En effet, cette structure permet de mettre en oeuvre des concepts modernes de gestion (groupes de progrès, cercles de qualité, groupes autonomes,...), dans lesquels les décisions sont prises par un collectif intégrant les différents acteurs concernés par une prise de décision.

Ce concept de collectif, assimilé à un agent virtuel, qui a la même architecture que les autres agents, mais possède d'avantage de connaissances que la somme des connaissances des agents du groupe, si on fait référence au principe que : « *l'ensemble est plus que la somme des parties* ». Les décisions, d'un certain niveau « méta », que va générer cet agent virtuel, sont le fruit des interactions entre agents constituant le groupe. Celles-ci sont essentiellement utiles pour prendre des décisions collectives et résoudre des conflits.

Dans ce cadre organisationnel, on va définir les différents types d'interaction et de communication, car c'est le contexte organisationnel qui acceptera, refusera et contrôlera les interactions entre agents, en d'autres termes c'est le régulateur des interactions dans les systèmes multi-agents.

## 3.2 Interaction vs Communication

L'interaction est définie comme étant toute action conjointe (conflictuelle et/ou coopérative) mettant en jeu deux ou plusieurs acteurs [Vion, 92]. Il en découle que toute action entreprise par un individu s'inscrivant dans un cadre social peut être considérée comme relevant de l'interaction (échange conversationnel par exemple). Ainsi, dans ces travaux, nous considérons la communication comme un support pour l'interaction.

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre II, la communication dans l'univers multi-agents n'est plus une simple tâche d'entrée-sortie, mais doit être modélisée comme un acte pouvant influencer sur l'état des autres agents.

Nous allons décrire le modèle communicationnel, par rapport à notre problématique et au modèle d'organisation productive, selon deux dimensions :

*structurelle* qui précise quelles sont les connections physiques entre les agents et quelle est leur nature ;

*décisionnelle* qui désigne le contrôle des échanges entre les agents. En effet, il est nécessaire de décider dans quelles situations les échanges entre deux agents ont lieu et quelles sont alors les données échangées.

### 3.2.1 Dimension structurelle de la communication

A travers cette dimension, nous allons essayer de répondre aux questions « Avec Qui » ? et « Comment les agents communiquent » ?.

Nous allons reprendre le modèle d'organisation productive à trois niveaux imbriqués<sup>98</sup> (projet, processus, chaîne d'activités) (fig. IV. 14), pour identifier les agents communicants.

Par exemple, si nous assimilons l'agent du niveau projet  $AC_{21}$  (fig. IV. 14) à un responsable d'unité, et respectivement l'agent  $AC_{11}$  à un responsable administratif et  $AC_{12}$  à un responsable de production, les liens de communications entre eux sont :

⇒ dans le cas des liens hiérarchiques, le responsable d'unité transmet des directives (rationalité évaluative, rationalité structurelle, décision) au responsable administratif et au responsable de production, dans une visée de modification des conditions de production. A leur tour, le responsable administratif et le responsable de production déclinent ces directives et les transmettent aux agents du niveau inférieur (des scénarios de déclinaison de directives seront traités en détails dans le chapitre VII et en annexe A).

⇒ pour ce qui est des liens de dépendances, le responsable administratif et le responsable de production dépendent l'un de l'autre et sont souvent amenés à communiquer pour améliorer leur performance propre. Par exemple, le responsable de production négocie la liste d'ordre de fabrication (types de produits, quantités à produire, numéros de poste de travail), établi par les agents du processus administratif, si elle ne satisfait pas les attentes des agents du niveau production. Les agents d'un même processus, liés par le même flux (informations, matières, ou ressources), sont aussi amenés à communiquer pour par exemple mieux gérer les stocks intermédiaires et le rendement de leur poste de travail.

⇒ dans une organisation de type « effet de groupe », les agents se réunissent, généralement, pour prendre des décisions d'une manière collective (ce qui correspond à la nouvelle vision d'entreprise en terme de réactivité, d'autonomie, etc..) . Ils échangent des avis, des informations, ils négocient, collaborent, se concertent dans un cadre orienté par les rationalités et les intentions de chacun des membres du groupe (un scénario de négociation et de résolution de conflit sera traité au § 3.3).

<sup>98</sup> Notons bien que cette représentation ne prétend pas donner une description absolue de la structure d'une organisation productive.

Dans notre système, la communication entre les agents repose explicitement sur des *mécanismes d'envoi de message* soit à un agent, dans le cas d'un message directive, soit à un agent ou un groupe d'agents, dans le cas d'un message information ou requête.

Comme nous l'avons déjà vu au paragraphe 2.2.3, chaque agent possède une boîte aux lettres dans laquelle sont stockés les différents messages suivant leurs niveau d'importance (urgent, prioritaire, normal), une méthode d'interprétation, et une méthode d'envoi de messages.

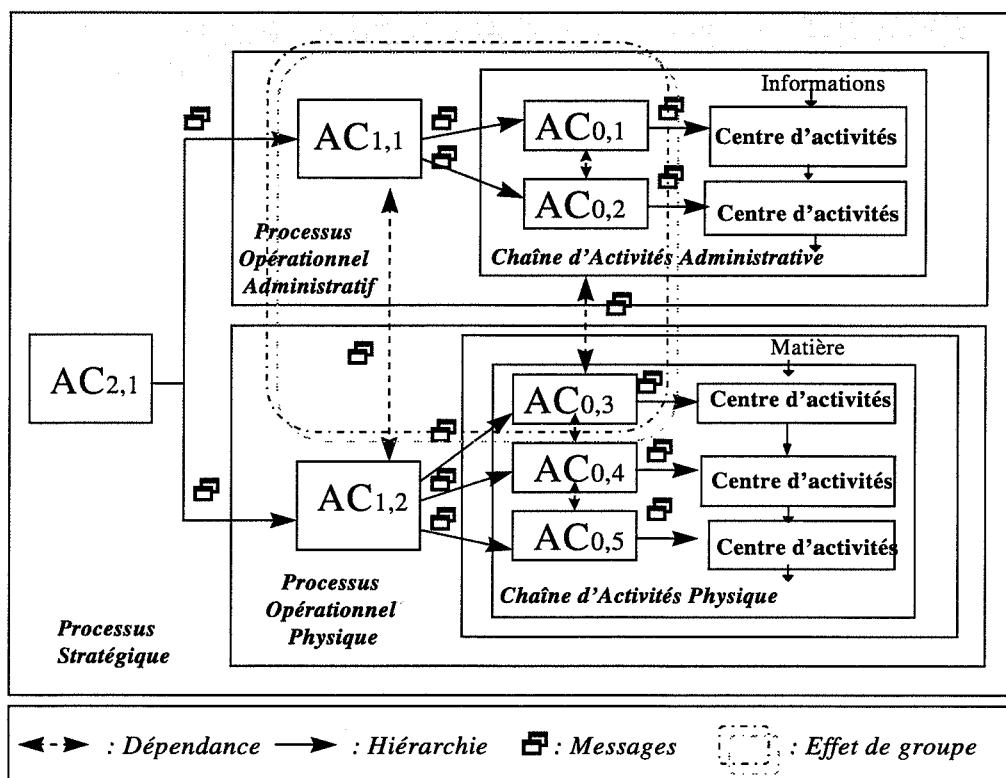


Figure IV. 14 : Communication dans MAC1

Lorsqu'un agent reçoit un message, il détermine sa nature (Interprétation), et le transmet au module de contrôle pour un raisonnement et une prise d'engagement suivant la nature du message :

Si le message est une directive, l'engagement est une autre directive pour l'agent d'un niveau inférieur ou le centre d'activité.

Si le message est une requête, l'engagement est une réponse à cette requête.

Si le message est une réponse à une requête ou une information, le module de contrôle traite cette réponse ou information, et met à jour les connaissances de l'agent.

Après cette prise d'engagement, le module de communication, crée le message sous une forme bien déterminée (fig. IV. 15), et l'envoie au(x) destinataire(s).

Numéro :	Numéro d'identification : « 547 »
Agent Expéditeur :	Le nom de l'agent qui envoie le message : « AC <sub>02</sub> »
Agent Destinataire :	Le nom de l'agent à qui est adressé le message : « AC <sub>01</sub> »
Nature :	Une directive, une requête, une réponse, une information, etc.) : « requête »
Type :	L'importance du message (urgent, prioritaire, normal) : « prioritaire »
Etat :	L'état du message (traité, non-traité) : « non- traité »
Contenu :	Le Corps du message : « formule du calcul des besoins »
Date :	Date d'envoi du message : « 15/25/15 »

Figure IV. 15 : Structure générique d'un Message et exemple d'une Requête

### 3.2.2 Dimension décisionnelle de la communication

Cette dimension traite les questions Que et Quand communiquer ? Pour répondre à ces questions, il faut identifier et définir les situations qui vont nécessiter la communication et les moyens d'y parvenir.

Dans une organisation productive, la mission principale des agents est de prendre des décisions pour gérer leur centre d'activités. Cette prise de décision se fait de deux manières :

⇒ soit d'une manière périodique, selon les différents niveaux de l'organisation.

- l'agent stratégique prend des décisions à long terme, par exemple : *être leader sur le marché européen, acquérir la norme qualité ISO 9000, etc..* ;
- les agents du niveau processus prennent des décisions à moyen terme (quatre à six semaines), exemple : *appliquer une nouvelle méthode d'ordonnancement (calcul des tailles des lots de produits, ordre de leur passage sur les postes de travail), etc..*
- les agents du niveau opérationnel à court terme (chaque jour), exemple : *quantité des pièces à produire, changement d'ordre de fabrication des lots de produits, etc..*

⇒ soit d'une manière imprévue ( de blocage ou de panne, etc..), à titre d'exemple :

- l'agent du niveau projet va être amené à prendre une décision stratégique d'urgence, d'investissement ou autre, dans le cas où le client lui impose la norme ISO, ou encore si le concurrent direct met sur le marché le même produit à un prix nettement réduit, ce qui entraînera une révision de technologie ou d'organisation et donc des décisions stratégiques.
- les agents du niveau processus (management) prennent de nouvelles décisions face à des événements non planifiables de type *absence du personnel, ruptures répétées des stocks, etc..*

- les agents du niveau chaîne d'activités (opérationnel) sont dotés d'une certaine autonomie, ils réagissent en temps réel face, par exemple à *une panne de machine, un manque de lubrifiant, etc..*

Toutes ces situations de prise de décision nécessitent des demandes d'informations complémentaires, de l'aide des autres agents (requêtes), des concertations, et donc de la communication.

Nous allons décrire maintenant les éléments porteurs d'informations ou d'actions qui vont permettre la mise en oeuvre de la communication (objets de communication).

Comme nous l'avions signalé au paragraphe 2.1.3 deux grandes classes de messages circulent entre agents, dont la forme générique est illustrée par la figure IV. 15 :

- le premier type de message permet le passage de directive (rationalité évaluative et structurelle + décision) entre agents d'un niveau à un autre,
- le second type de message permet l'échange des informations et des requêtes entre les agents.

Les propriétés qui caractérisent un message (fig. IV. 15) sont : son numéro d'identification, le nom de l'expéditeur et du destinataire, son type qui permet son classement dans la boîte aux lettres, son état, son contenu et la date d'envoi, et bien sûr sa nature, que nous allons détailler, qui peut être une directive (rationalités + décision), une requête, une réponse à une requête, ou bien une information.

**Directive** (fig. IV. 16) : les rationalités évaluative et structurelle et la décision sont liées à la structure de représentation hiérarchique de l'organisation, c'est-à-dire qu'elles sont transmises d'un niveau à un autre par les agents. Le destinataire est soit un agent avec lequel il existe un lien de type hiérarchique soit un centre d'activité, il faudra donc spécifier le numéro du centre ou le nom de l'agent destinataire. Il faut signaler aussi qu'au niveau chaîne d'activités les directives sont exclusivement des décisions.

Ce type de message engendre une mise à jour du module « Rationalités/Décisions »<sup>99</sup> de l'agent et l'activation d'un processus de raisonnement avec éventuellement pour objectif de créer une nouvelle directive pour un autre niveau.

Numéro :	«12»
Agent Expéditeur :	«AC <sub>12</sub> »
Agent Destinataire :	«AC <sub>0,1</sub> »
Nature :	«Directive»
Type :	«Prioritaire»
Etat :	«Traité»
Contenu :	« • Décision = Appliquer méthode Calcul des besoins (Stock réel) • Rationalité_Evaluative = Pas de retard pour client X • Rationalité_Structurelle = Possibilité d'augmentation de stocks »
Date :	« 10/10/27 »

Figure IV. 16 : Structure d'un Message directive

<sup>99</sup> Voir figure IV. 2 «Architecture fonctionnelle d'un agent cognitif ».



**Requête / Réponse** : la requête est associée à un type de problème. Les destinataires sont essentiellement les accointances de l'agent expéditeur. Ce type de message peut être urgent, prioritaire ou normal, ce qui entraînera une classification particulière dans la boîte aux lettres, et un traitement (suivant le type), de la part de l'agent receveur. Le contenu est spécifique à partir du moment où le message est interprété comme étant une requête, c'est-à-dire que la syntaxe du contenu est relative au processus dans lequel se trouve l'agent. Un certain nombre de possibilités (problèmes associés aux requêtes) est défini lors de la création des agents et de la spécification des liens.

**Information** : les messages informationnels classiques représentent des renseignements que transmet un agent à un ou à l'ensemble des agents qui forment ses accointances. Ils sont soit prioritaires, soit de type normal. En effet, les informations transmises ne doivent pas interrompre les processus en cours. S'il y a une urgence l'information doit être envoyée sous forme de requête.

### 3.3 Coopération, Négociation, Résolution de Conflits

« ...tout système de décision est incomplet et nécessite l'appréciation par un décideur de son environnement, ainsi que des échanges entre décideurs... »

[Cohendet, Llerena, 90]

Dans ce mémoire, nous considérons que les agents sont coopératifs volontairement et n'ont pas de relation d'opposition ou de haine envers autrui. Les agents sont impliqués dans un environnement dominé par des impératifs d'organisation et de fonctionnalité, et ils sont liés par des engagements relationnels, un contrat social où prime la notion d'intérêt général. Malgré tout, des conflits peuvent surgir, et les agents doivent les résoudre dans les meilleurs délais.

Nous rappelons, qu'une organisation productive est constituée d'un ensemble d'agents décisionnels à la fois autonomes et interdépendants. Ce sont des agents autonomes car ils disposent parfois d'un très grand degré de liberté dans leurs prises de décision et de rationalités. Cependant, ils prennent leurs directives en même vision de l'entreprise (qui évolue continuellement avec les directives des uns et des autres) néanmoins leurs directives sont parfois concurrentes et sources de conflits, qui doivent être absolument résolus pour la bonne marche de l'organisation productive. Nous donnons un exemple d'organisation (fig. IV. 14) d'un projet d'entreprise [Burlat, 96], [Ouzrout & al., 96] : le projet « Production » constitué de deux processus : le processus administratif avec deux activités principales : le calcul des besoins (CdB) et l'ordonnancement (Ordo), et le processus physique avec comme activités : le fraisage et l'usinage.

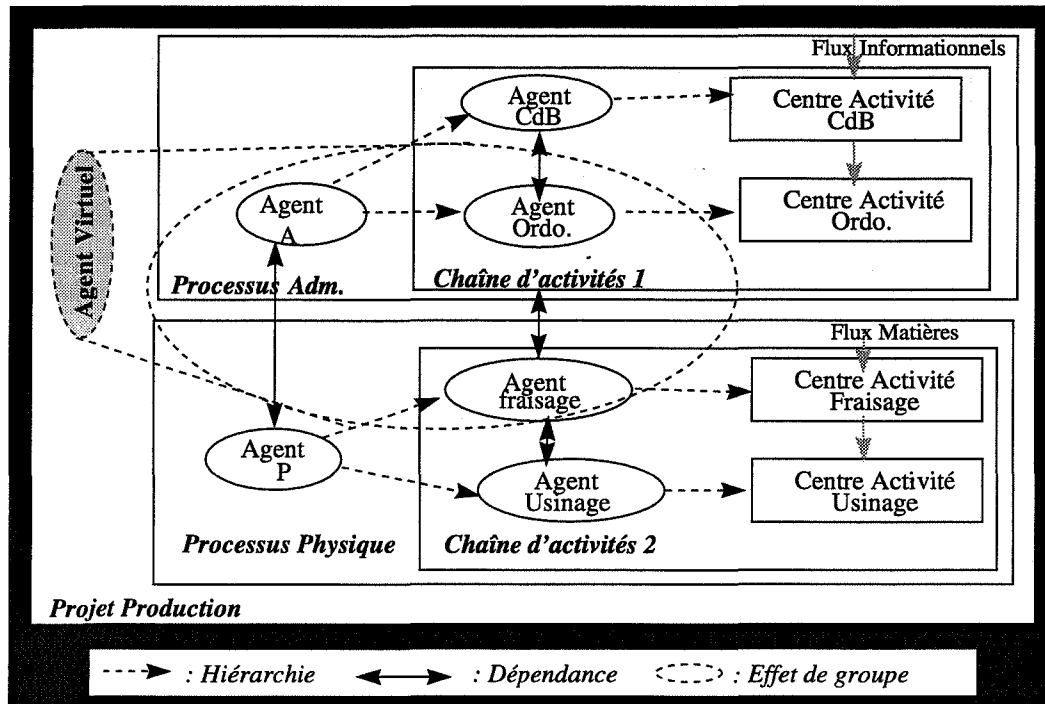


Figure IV. 17 : Exemple simplifié d'une organisation productive

La configuration initiale (cf. fig. IV. 17) déterminée par l'agent administratif « A », par le biais d'une **décision**, fixe la taille du « lot de production » à 35 pièces. Par ailleurs, chaque agent dispose de connaissances et de rationalités propres qui vont guider son comportement :

⇒ L'agent « **Ordo** » sera évalué (**Rationalité évaluative (Re)**) sur les *retards de livraison aux clients* (*nombre d'heures de retard / nombre de produits vendus en retard*), le niveau de retard maximal est de 4,5 jours. L'agent possède parmi ses **compétences** une connaissance importante : « *une petite taille de lot permet de diminuer les retards* ».

⇒ L'agent « **Fraisage** » quant à lui, sera évalué sur le *rendement physique* (*temps de production / temps d'ouverture*) ; Le niveau de rendement à atteindre est de « 57% ». Une des ses **connaissances** spécifie que pour « *améliorer le rendement il faut limiter les changements d'outils, ce qui revient à augmenter la taille des lots* ».

Enfin, chaque agent a l'« **intention** » de *respecter les rationalités* qui lui sont fixées, d'où la nécessité d'entamer un processus de négociation, permettant d'aboutir à une situation « satisfaisante » pour les deux, sinon à une situation de conflit.

Au bout d'une semaine (40 heures), l'agent « **Fraisage** » constate qu'il est en dessous de son niveau, c'est à dire à 54,5%<sup>100</sup>, ainsi sa **Re** n'est pas satisfaite. Il décide alors d'entamer une procédure de négociation avec l'agent « **Ordo** ». Il lui envoie une requête lui demandant d'augmenter la taille des lots qui peut satisfaire les rationalités des deux agents. Si l'agent « **Ordo** » ne veut pas coopérer, les deux agents vont se retrouver dans une situation conflictuelle d'où la nécessité d'intervention d'un agent dit « **agent** »

<sup>100</sup> Résultats retournés par le simulateur.

**virtuel**» (cf. §. 3.1.3), pour redéfinir les rationalités des uns et des autres jusqu'à arriver à un compromis. Il est important de prévoir un mécanisme capable d'arbitrer ces conflits pour prendre la décision finale [(de) Terssac & Lompré, 94]<sup>101</sup>.

Nous rappelons, que dès qu'une situation de conflit est détectée par un agent d'un niveau supérieur (message signalant un refus de négociation par exemple) dans notre organisation productive, un agent virtuel (similaire à un équipe de réflexion dans une organisation humaine) sera activé dynamiquement pour résoudre ce conflit né des interactions du groupe. Ce type d'agent possède un ensemble de méta-connaissances formant l'ensemble des connaissances des différents agents qui constituent le groupe en question, auxquelles sont ajoutées une représentation des « intentions » et des « rationalités » de chacun. L'intérêt de ces connaissances est qu'elles permettent de dépasser les « intentions » et « rationalités » propres des agents pour satisfaire les objectifs d'un collectif, c'est à dire favoriser le comportement global de l'entreprise par rapport aux comportements individuels des agents.

Les raisonnements de cet « agent virtuel » permettront donc de définir des « Décisions » pour les différents agents du collectif, et de modifier leurs « Rationalités », voire même leurs « intentions » afin de mettre un terme à la situation conflictuelle et aux indifférences. Pour cela, il utilisera les canaux de communication (messages, décisions,...) utilisés par les agents cognitifs.

## 4 CONCLUSION

L'incertitude qui affecte l'environnement externe ou interne de l'entreprise et l'irruption de la variété obligent à voir la structure de décision, non comme une structure centralisée, mais comme une structure distribuée entre plusieurs centres [Huguet, al., 96] : pour gérer le variable de l'incertain, chaque centre doit disposer d'une autonomie et liberté de choix pour prendre ses décisions ( problématique, chapitre I).

Le modèle d'agents MAC1 proposé dans ce chapitre répond à cette problématique. En effet, l'intégration des concepts liés aux systèmes multi-agents au modèle d'organisation productive Méta2 (décrit au chapitre I), a permis d'étudier et de comprendre les phénomènes d'orientation de la décision, sachant que la prise de décision est la tâche principale d'une personne dans un contexte industriel.

Les systèmes multi-agents offrent des solutions à la problématique de prise de décision dans les organisations, chaque acteur qui intervient dans des processus opérationnels étant modélisé sous la forme d'un agent. Dans ce contexte chaque agent a un point de vue différent et participe à la définition des objectifs et aux performances globales de l'entreprise.

Cette architecture, a permis de formaliser et d'étudier l'état mental (intention, croyances, engagements, compétences etc..) d'un acteur décisionnel, ainsi que ses interactions et communications avec les autres membres de l'organisation.

<sup>101</sup> Ils ont donné un exemple intéressant à ce sujet.

En général, les humains, pendant qu'ils exécutent une activité quelconque, s'efforcent généralement aussi d'améliorer la manière dont ils l'accomplissent<sup>102</sup>. En d'autres termes l'exécution chez l'homme d'une tâche quelle qu'elle soit, et surtout la prise de décision, est inséparablement liée à un processus d'apprentissage. Suivant cette optique là, nous avons décidé de doter cette communauté d'agents de la capacité d'apprendre et ainsi d'améliorer leurs performances en terme de prise de décisions (chap. V). De plus, la mise en place d'un processus d'apprentissage, défini comme « la faculté d'utiliser les effets passés de l'adaptation », se manifeste par la capacité d'atteindre plus rapidement qu'auparavant une zone de stabilité satisfaisante face à un type de perturbation extérieure.

---

<sup>102</sup> S. Ryszard, Michalski et Yves Kodratoff : Apprentissage symbolique , une approche de l'IA, tome II.Cépaduès-éditions, 1993, p. 2.



## CHAPITRE V

### MODELE D'AGENTS COGNITIFS : MAC2



*L'objectif est d'assurer la réutilisation de la connaissance décisionnelle en vue de la prise de nouvelles décisions dans des contextes ou des situations analogues.*

*Nous présentons donc, dans ce chapitre, le modèle d'agents MAC1 auquel nous associons un module d'apprentissage : MAC2. Ce module est un système de raisonnement à partir de cas permettant à l'agent d'enrichir ses connaissances (stockage de nouveaux cas dans la base de cas initiale). Ce raisonnement permet de réutiliser des solutions passées, ou d'éviter de refaire à l'avenir les mêmes erreurs.*



## 1 INTRODUCTION

Raisonnement par cas est une activité courante, aussi bien dans les situations quotidiennes où le bon sens intervient largement que dans la vie professionnelle, et ce dans divers domaines d'activités (médecine, droit ou dans l'industrie). Ainsi, le responsable, par exemple, d'un équipement complexe (grosse machine-outil, chariot électrique, etc..) fera d'abord appel à la mémoire des incidents passés, pour prendre une décision devant une nouvelle panne qui lui est signalée. Dans cette situation de raisonnement, le rappel d'un cas déjà rencontré peut être utilisé : soit pour suggérer une solution au nouveau problème à résoudre (par exemple la procédure à suivre suite à une panne), soit pour proposer des moyens d'adapter une solution qui ne convient pas totalement.

Dans ce type de raisonnement, beaucoup de questions se posent : qu'est ce qu'un cas ? quel est son contenu ? quelle organisation pour la mémoire des cas ? quels ensembles d'index sont appropriés pour classifier les cas ? selon quelles règles d'indexation ? comment apparier un cas et un nouveau problème ? comment adapter une solution ? comment la mémoriser et enrichir la connaissance du système ? Nous allons essayer de répondre à ces questions, dans le cadre de notre problématique initiale.

## 2 DE MAC1 A MAC2

### 2.1 Architecture d'un agent de « MAC2 »

MAC2 est un modèle d'agents cognitifs dotés de la faculté d'apprentissage (fig. V. 1). Le mécanisme choisi leur permet d'apprendre et d'extraire des connaissances à partir d'expériences vécues. Il s'agit plus précisément de résoudre un problème nouveau, d'illustrer, ou critiquer des situations nouvelles à partir soit d'expériences passées analogues, soit d'interactions entre agents.

Le module d'apprentissage (fig. V. 1), permettant un enrichissement des connaissances de l'agent (stockage de nouveaux cas dans la base de cas initiale), est un système de raisonnement à partir de cas adapté pour le système multi-agents. On note, que ce mécanisme de raisonnement est un mécanisme complémentaire au mécanisme classique vu dans MAC1 au chapitre IV.

Le travail que nous proposons, concernant le raisonnement à partir de cas, s'est inspiré des travaux<sup>103</sup> de Agnar Aamodt [Aamodt & Plaza, 94], qui ont été brièvement décrits au chapitre III.

---

<sup>103</sup> Nous ne retiendrons dans ce mémoire que les éléments qui inspirent les choix de notre recherche.



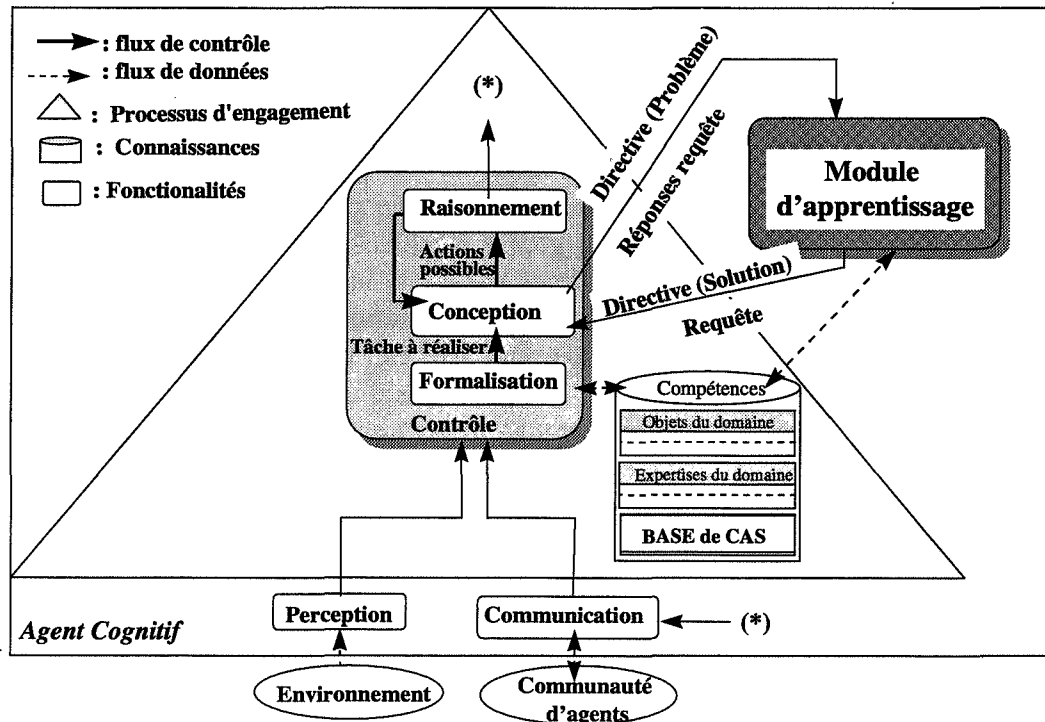


Figure V. 1 : Architecture d'un agent dans MAC2

Examinons le rôle de ce module dans le cadre des relations de l'agent avec la société qui l'entoure.

## 2.2 Fonctionnement d'un agent

Après identification et interprétation du message reçu, l'agent, par le biais des phases de conception et raisonnement, construit les solutions suivant le type de message :

si le message est une requête, réponse à une requête, ou une information (voir chapitre IV), l'agent fait appel à un raisonnement (dit classique) basé sur les compétences, les accointances, et les croyances, etc..

si le message est une directive (rationalités et décision) du niveau supérieur, l'agent en question doit décliner cette directive et précisément prendre une autre directive pour les agents dépendants de lui, cette déclinaison constitue le problème à résoudre. Plusieurs configurations sont alors possibles pour résoudre ce problème dans MAC2 :

1. l'agent dans un premier temps va déclencher le raisonnement à partir de cas, situés dans le module d'apprentissage (fig. V. 1), pour essayer d'exploiter la solution d'une situation similaire passée.
2. Si aucune situation n'est similaire ou adaptable, l'agent déclenche un raisonnement dit classique sur les objets et expertises du domaine (voir chapitre IV), et ainsi un nouveau cas est créé et rajouté à la base de cas.
3. Sinon, il aura recours aux autres agents, répertoriés dans le module accointances, compétents pour résoudre ce type de problème.

Dans ce chapitre, nous allons détailler essentiellement le raisonnement à partir de cas (CBR) dont le problème en entrée est une directive.

Le CBR étant déclenché, le module d'apprentissage cherche et sélectionne le meilleur cas répondant à sa problématique. Après son adaptation, il transmet la directive (solution) du cas sélectionné au module conception de l'agent, qui lui, à son tour va le transmettre au module raisonnement. Ce dernier se charge de déterminer le(s) destinataire(s), en faisant appel au module accointances, pour lui (leur) envoyer cette directive.

Pendant les phases du raisonnement à partir de cas, l'agent peut demander de l'aide, consulter, ou se concerter avec les autres agents, via la communication et les messages sous forme de requêtes et de réponses à des requêtes (voir fig. V. 1).

Les conséquences de l'application de cette directive (ensemble d'indicateurs de performance) seront récupérés par l'agent via le module de perception pour une mise à jour du cas et ainsi de sa base de cas. Ceci permettra d'apprécier la pertinence des directives prises.

Nous reviendrons sur ce fonctionnement d'une manière plus détaillée dans le paragraphe suivant.

### 3 CYCLE D'APPRENTISSAGE D'UN AGENT

#### 3.1 Description d'un cas

Le cas est une entité au sein de laquelle sont rassemblées diverses informations sur une situation passée. Nous les avons réparties en trois catégories (cf. fig. V. 2) :

1. Le **problème** (paramètres sources) : c'est à dire la directive arrivée d'un niveau supérieur (les rationalités et décision), l'intention propre, et le contexte dans lequel est prise cette directive. Dans le cadre du processus de production, la structure organisationnelle (rationalités et décision du niveau supérieur) ainsi que l'intention propre de l'agent concerné semblent les éléments les plus structurants du processus de décision, ce seront donc les descripteurs les plus discriminants de notre cas. Le contexte courant au moment du déclenchement du processus de décision permettra de moduler la solution.

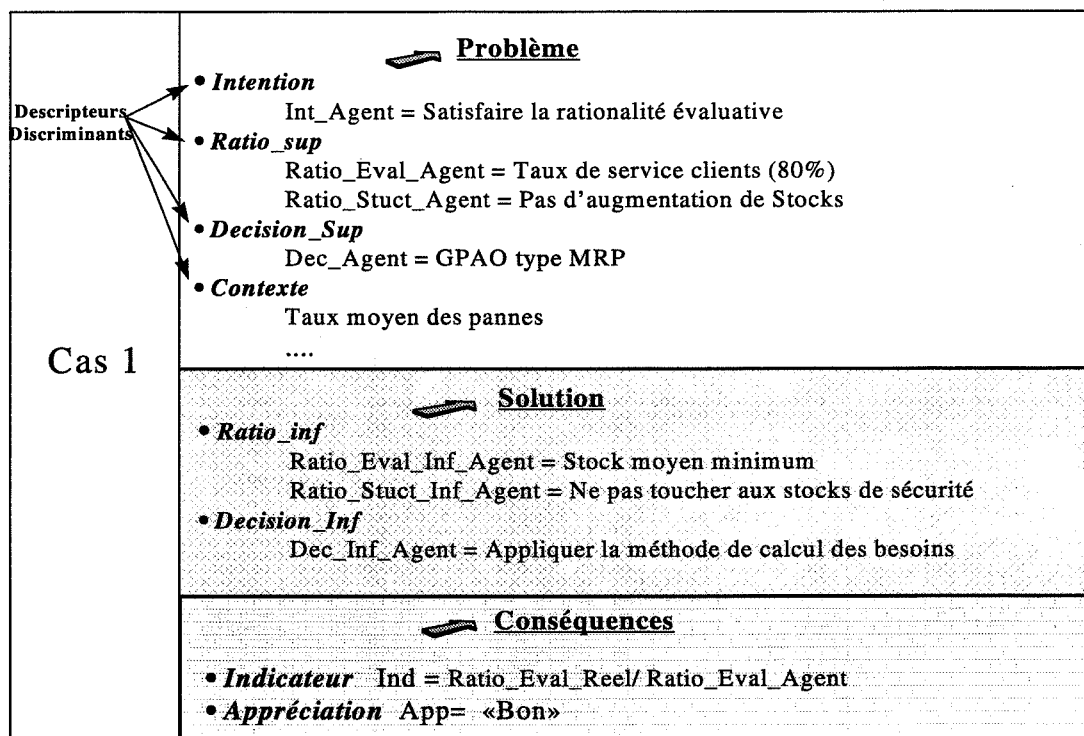
2. La **solution** (paramètres cibles) : en général, ce sont les indicateurs du comportement, et en particulier c'est la directive (rationalités et décision) que doit prendre un agent pour répondre au problème, autrement dit c'est une déclinaison de la directive posée comme problème.

3. les *conséquences*<sup>104</sup> (résultats) de l'application de cette solution : ils nous sont fournis par le simulateur via la perception de l'agent (voir chapitre VI). Elles se composent de deux valeurs :

- **Indicateur (ou degré de satisfaction)**, qui n'est autre que le ratio de la rationalité évaluative réelle (indicateur retourné par le simulateur) et la rationalité évaluative de l'agent (objectif fixé).
- **Appréciation**, qui permettra l'évaluation et le classement du cas comme étant (par abus de langage) « *bon* » ou « *mauvais* » par rapport toujours à l'objectif fixé. Ainsi, l'agent pourra réutiliser ce cas ou l'éviter dans l'avenir.

Le concept de contexte, comme nous l'avons signalés au chapitre IV, n'est autre que les croyances d'un agent à un instant donné (ex. données de production, états des machines etc.). Il est représenté par des faits constatés par l'agent à un temps  $t$ .

Le contenu du contexte diffère d'un agent à un autre selon le niveau de l'organisation. Par exemple au niveau processus physique, le contexte *représente* « l'état des stocks, états des machines, etc.. ». Au niveau projet, il peut être par exemple, « le concurrent direct a baissé les prix de 7,5%, etc.. ». Il faut noter que tous les agents d'un même centre d'activité (voir chapitre I) ont le même contexte.



*Figure V. 2 : Description d'un Cas*

### 3.2 Organisation des cas

Une mémoire de cas peut contenir un grand nombre de cas. Il s'avère alors fastidieux de comparer chaque cas avec le problème cible. Afin d'éviter ceci, la mémoire est souvent

<sup>104</sup> Ce point est propre à notre problématique. La plupart des travaux de recherche (ex. R. Bergmann, 98) ne tiennent compte que des deux premiers points (problème, solution).

organisée ; ainsi, lors de la récupération, le système accède rapidement au groupe de cas le plus proche du problème cible. L'accès à ces groupes de cas se fait par des index qui sont discriminants pour chaque groupe. Les techniques classiques de construction de ce type de mémoires sont les *réseaux de discrimination*<sup>105</sup> [Feigenbaum, 63] tels que la mémoire dynamique [Schank, 83], les arbres de décisions [Quinlan, 86] ou les arbres k-dimensionnels [Bentley, 75, Wess & al., 93]. L'organisation de la mémoire sous forme de réseau de discrimination accélère les opérations de récupération et de mémorisation.

Nous avons donc opté pour ce type d'organisation de notre mémoire expérimentale (base de cas). La technique utilisée est un arbre k-dimensionnel, dont les noeuds correspondent aux descripteurs les plus discriminants (intentions, rationalités évaluatives et structurelles, et décisions), les feuilles correspondent aux cas (fig. V. 3). *K* indique les différentes dimensions de l'espace de recherche, c'est-à-dire le nombre de descripteurs utilisés. Cette structure permet de réduire le nombre de cas jugés intéressants pour le calcul de la similarité, elle élimine les cas dont les valeurs des cas descripteurs ne correspondent pas à celles du nouveau cas.

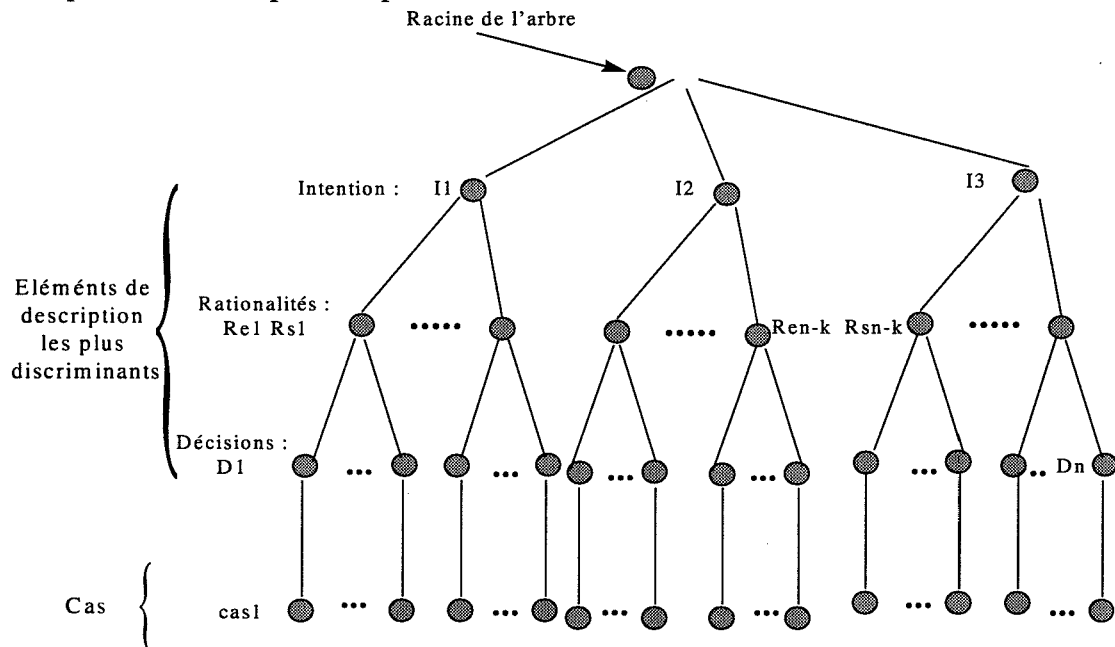


Figure V. 3 : Arbre de cas

### 3.3 Etapes du module d'apprentissage de l'agent

Le processus méthodologique (fig. V. 4) de notre module d'apprentissage est construit à partir d'une architecture du système de raisonnement à partir de cas de Aamodt<sup>106</sup> & Plaza. Nous considérons quatre étapes qui nous semblent particulièrement pertinentes pour la résolution de problèmes et la prise de décision :

<sup>105</sup> Voir [Charniak & al., 87] pour la mise en oeuvre de réseaux de discrimination.

<sup>106</sup> Agnar Aamodt et de Enric Plaza [Aamodt & Plaza, 94] ; <http://www.iiia.csic.es/People/enric/AICom.html>

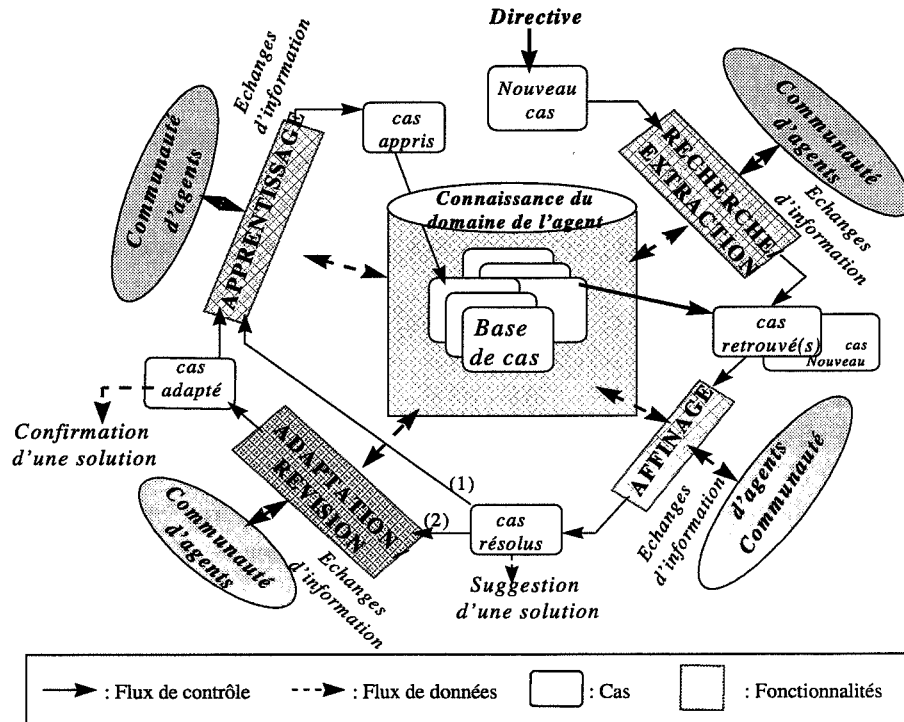


Figure V. 4 : Cycle d'apprentissage d'un agent dans une organisation productive

- **recherche** et **extraction** des cas les plus similaires par rapport au problème posé ;
- **Affinage** de l'information et de la connaissance contenues dans ces cas afin de suggérer une solution ;
- **adaptation** et **révision** de cette solution par rapport au nouveau problème ;
- **apprentissage** du problème résolu dans la base de cas.

Chacune de ces étapes est constituée d'un ensemble de phases illustrées par la figure V.5. Ces différentes phases sont détaillées, dans le cadre de la prise de décision, dans les paragraphes suivants.

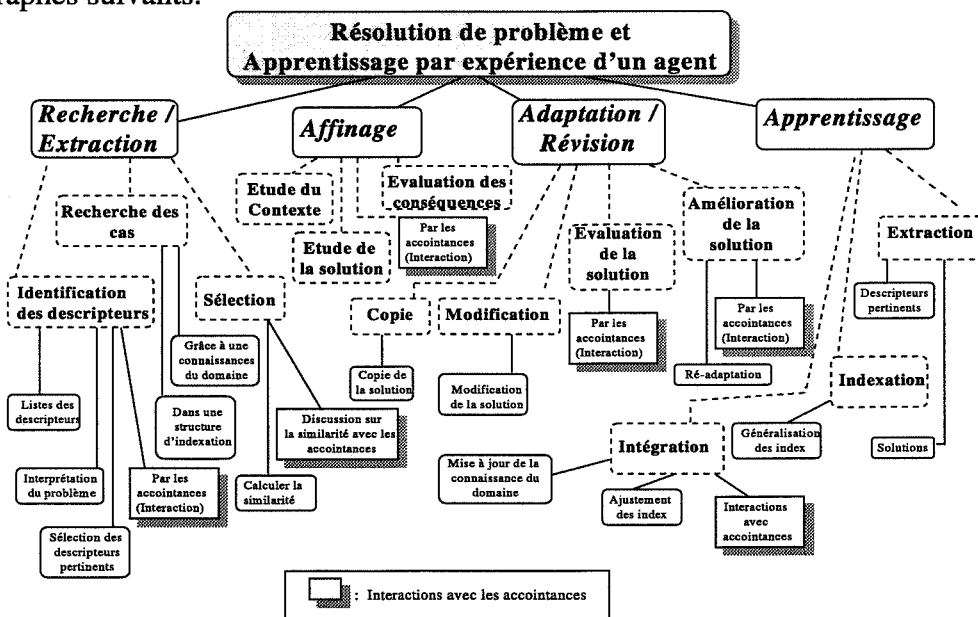


Figure V. 5 : Hiérarchie de tâches du raisonnement à partir de cas de l'agent

### 3.3.1 Recherche et extraction des cas similaires

Quand un nouveau problème se présente, il faut tout d'abord l'évaluer, c'est à dire analyser sa description initiale et déterminer explicitement les descripteurs les plus discriminants, et transformer cette description de manière à ce qu'elle soit exprimée dans le même vocabulaire que les cas en mémoire. Pour A. Mille [Mille, 95], il s'agit d'établir une « signature du problème à résoudre » qui sera capable d'activer la mémoire des cas de façon à retrouver les solutions les plus faciles à adapter.

Ainsi cette partie s'effectue en trois temps :

#### 3.3.1.1 Identification des descripteurs

L'agent, dans un premier temps, va interpréter la directive en entrée (problème), en essayant d'identifier la liste des descripteurs (intention, rationalités évaluative et structurelle, décision) du cas en entrée<sup>107</sup>, et d'en définir les plus discriminants.

#### 3.3.1.2 Recherche des cas

La mémoire étant indexée (cf. § 3.2), un parcours de l'arbre va être effectué et un ensemble de cas potentiellement pertinents est recherché grâce aux index fournis, par les descripteurs du nouveau problème, dans l'étape précédente. La recherche des cas sera guidée par des mesures de similarité.

#### 3.3.1.3 Sélection des cas similaires

La similarité permet de trouver les cas qui se rapprochent le plus du nouveau problème à résoudre. Cette recherche est effectuée en déclenchant le calcul d'une mesure de similarité entre les descripteurs discriminants des cas sélectionnés par l'arbre d'index et du nouveau problème. Le résultat est un ensemble de cas sémantiquement proche du problème à résoudre.

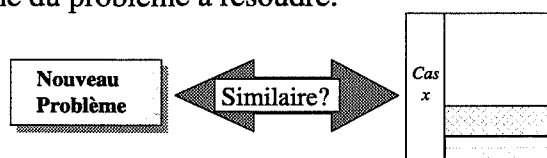


Figure V. 6: Quand deux cas sont-ils similaires ?

Comme nous l'avons signalé au chapitre III, l'évaluation de la similarité entre deux cas est basée sur l'estimation des similarités dites locales *sim<sub>i</sub>*, entre les valeurs de chaque descripteur  $y_i$ . Puis les similarités globales sont agrégées sur la base d'une fonction de sommation des similarités locales.

Les mesures de similarités locales adoptées sont fonction de plusieurs critères (voir chapitre III, fig. III. 3) : du type de descripteur (booléen, nominal, ordinal, numérique,

<sup>107</sup> Par abus de langage, on parle de cas en entrée, mais en vérité, ce n'est qu'une partie du cas (partie problème).

taxinomie, etc..) et de la taille des ensembles sur lesquels la similarité est évaluée (le cardinal pour les descripteurs nominaux, l'étendue pour les descripteurs numériques).

Exemple de calcul de similarité pour le descripteur *intention*. Dans le cadre de notre projet, l'intention est un descripteur nominal monovalué.

*Intention* = {*Satisfaction\_rationalité\_évaluative*, *Non\_satisfaction\_rationalité\_évaluative*, *Faire\_du\_zèle* }.

Ainsi, la mesure de similarité entre deux intentions  $I_C$  (courant) et  $I_{IM}$  (intention 1 en mémoire) sera (voir chap. III, §. 3.4.3.3) :

$$\begin{aligned} Sim_{I_C, I_{IM}} &= 0, \text{ si } I_C \cap I_{IM} = \emptyset \\ Sim_{I_C, I_{IM}} &= 1, \text{ si } I_C \cap I_{IM} \neq \emptyset \end{aligned}$$

Après avoir mesuré les similarités pour tous les descripteurs discriminants  $i$ , une mesure de similarité globale **SIM** est entamée entre le cas courant  $C_1$  et le cas  $C_2$ , dont les mesures locales **sim<sub>i</sub>** sont les plus satisfaisantes.

$$SIM(C_1, C_2) = \frac{1}{P} \sqrt{\sum_{i=1}^P sim_i(V_{1i}, V_{2i})^2}$$

Où, P est le *nombre de descripteurs* = 4;  $V_{1i}$  (resp.  $V_{2i}$ ) : ensemble des valeurs possibles pour  $C_1$  (resp.  $C_2$ ) pour le descripteur  $y_i$ .

Plusieurs cas peuvent être plus ou moins proches, ainsi plusieurs solutions sont proposées, ce qui nécessite un affinage des cas.

### 3.3.2 Affinage

Cette tâche est propre à notre problématique, elle a pour objectif de proposer une solution au problème sur la base des solutions obtenues dans les cas retrouvés (phase précédente).

Une fois trouvés tous les cas (candidats) dont les descripteurs discriminants sont plus ou moins proches, un autre calcul de similarité va être lancé pour comparer les contextes de tous ces cas candidats avec le contexte du cas problème (courant) en tenant compte de leurs solutions. Le cas résultant (choisi) sera celui qui entraînera, le moins de changements du point de vue, par exemple, de l'organisation de la production, des investissements à faire, etc..

Les parties conséquences des cas similaires trouvés, vont jouer un rôle considérable et déterminant dans le choix de la solution, car elles mettent à disposition deux paramètres permettant d'évaluer le cas : **Ind** qui détermine à quel degré l'objectif (rationalité évaluative) était atteint, et **App**, une appréciation pondérée au cas (« bon » ou « mauvais »). Il faut signaler que lorsqu'il s'agit d'un nouveau cas la variable **App** n'a

pas de valeur, par contre si le cas résulte d'une adaptation quelconque, nous lui associons cette appréciation *App* indiquant que ce cas est bon ou mauvais par rapport au cas initial. A la fin de cette étape, deux cas de figures sont possibles (fig. V. 4) :

- (1) le cas problème avec la solution suggérée va être directement appris<sup>108</sup>, si le cas trouvé coïncide parfaitement, en terme de descripteurs discriminants et du contexte et si l'évaluation des conséquences est acceptable. Ainsi cette solution (directive) sera directement exploitée par l'agent, c'est-à-dire envoyée aux agents du niveau inférieur.
- (2) le cas suggéré nécessite une adaptation au niveau de la solution (cf. § 3.3.3) voire un apprentissage (§ 3.3.4), si aucune solution ne convient.

### 3.3.3 Adaptation et révision

L'adaptation de la solution obtenue à l'issue de l'étape précédente peut être réalisée de deux manières :

- le transfert de la solution du cas suggéré directement au nouveau cas, ce type d'adaptation est typique de l'être humain.
- le transfert paramétrique d'éléments partiels de la solution vers le nouveau cas, par exemple pour la solution (directive) proposée, nous imaginons ne transférer que les rationalités (évaluative et structurelle) et pas la décision. Dans un cas extrême l'agent raisonnera d'une manière dite classique pour inférer une décision en ayant éventuellement recours à la coopération des autres agents.

Le transfert de paramètre se fait généralement par des fonctions de calcul numérique permettant une interpolation entre les valeurs des descripteurs du problème et les valeurs des descripteurs des cas retrouvés.

Néanmoins, une révision d'une solution peut avoir lieu si la solution proposée nécessite de trop grandes modifications par exemple, la solution d'atteindre l'objectif *d'être leader sur la marché européen* peut être la mise en place d'une nouvelle méthode de gestion, si celle-ci demande un investissement en matériels et en effectifs important, c'est probablement une solution à réviser, et il est souhaitable de trouver une alternative.

Certains systèmes vérifient si les solutions fournies ne violent pas un ensemble de contraintes prédéfinies préalablement, et si c'est le cas, permettent de modifier la solution soit automatiquement comme dans CASEY [Koton, 89], soit simplement de proposer une modification qui doit être réalisée par l'utilisateur comme dans PROTOS [Bareiss, 88], ou bien en combinant ces deux possibilités comme dans CREEK [Aamodt, 91].

A la fin de cette étape un cas sera adapté et une solution sera confirmée, dont une copie sera transmise au module de contrôle pour l'expédier au destinataire, et une autre à la phase d'apprentissage.

---

<sup>108</sup> Nous verrons par la suite dans quelles situations (cf. § 3.3.4).



### 3.3.4 Apprentissage

L'apprentissage consiste à intégrer les résultats des étapes précédentes de manière à modifier (c'est à dire confirmer ou infirmer) le corpus de connaissances du domaine qui a entraîné la résolution du nouveau problème. Il se caractérise par (fig. V. 5) : l'intégration, l'indexation du nouveau cas dans la base de cas, et l'extraction des éléments utiles.

*Quand est ce qu'un cas sera appris ?* Après simulation de la solution proposée pour le problème, le paramètre **Ind** de la partie conséquence du cas sera comparé avec **Ind0**, conséquence du cas trouvé dans la base de cas (fig. V. 7) :

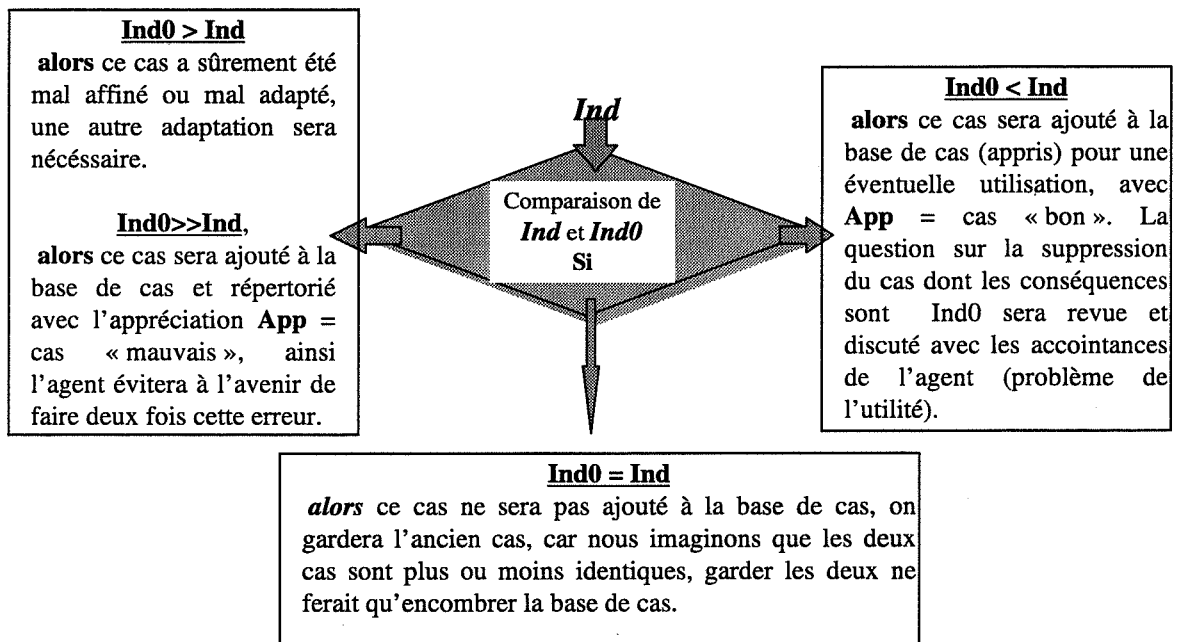


Figure V. 7 : *Quand est ce qu'un cas sera appris ?*

Nous sommes conscients que différents problèmes liés à l'apprentissage ne sont pas traités dans cette thèse, ils feront l'objet de perspectives éventuelles. Un exemple peut être le **problème de l'utilité** qui concerne les systèmes ayant recours aux techniques d'apprentissage pour améliorer leurs performances et/ou leurs compétences, mais dont il s'avère que les performances se dégradent au fur et à mesure que des connaissances sont apprises. En effet, un système qui acquiert des cas afin d'enrichir son expérience peut être confronté à une dégradation de la vitesse d'interaction avec la mémoire (récupération et mémorisation) en raison de l'augmentation du nombre de cas en mémoire. La seule solution au problème d'utilité consiste alors en l'adoption de stratégies d'acquisition sélective de nouveaux cas [Smyth & Keane, 95].

Dans notre système, un nouveau cas est acquis lorsqu'un cas extrait de la base (proche du cas problème) doit être profondément transformé pendant la phase d'adaptation. Cependant, cette stratégie ne suffit pas pour écarter le problème d'utilité. Il est préférable de s'assurer de l'originalité d'un nouveau cas par rapport aux cas déjà présents dans la mémoire. Ceci nous conduit, dans le prochain paragraphe, à définir les interactions de l'agent avec ses accointances lors d'un CBR.

## 4 INTERACTIONS POUR L'AIDE AU RAISONNEMENT ET A L'APPRENTISSAGE

Comme nous l'avons laissé entendre au chapitre III, nous avons opté pour un apprentissage individuel (basé sur le CBR) à partir du groupe (basé sur les interactions avec les accointances). Ce type d'apprentissage permet aux agents décideurs d'enrichir leurs compétences pour améliorer leurs résolutions de problèmes et d'ajuster leurs actions pour une bonne prise de décision.

Les interactions et la coopération entre les agents permettent à chacun de bénéficier de l'expérience des autres en plus de la sienne. Le contenu des messages échangés est alors bien plus intéressant que dans le cas d'agents travaillant individuellement. Les interactions peuvent alors servir de source de connaissances pour l'apprentissage.

**Quand est ce qu'un agent peut être amené à communiquer avec les autres agents (fig.V.4)?**

*recherche et extraction* des cas :

- Si les éléments de descriptions décrivant un cas ne sont pas clairement identifiés, alors l'agent les réclame à l'agent du niveau supérieur.
- Si l'agent ne trouve pas de cas similaire dans sa base de cas, et si après raisonnement sur les connaissances du domaine, il n'arrive pas à trouver une solution pour le problème posé (manque d'information et de compétences), alors il envoie un message requête à ses accointances leur demandant soit un cas similaire (transfert de cas), soit une heuristique (ensemble de règles), etc. Un nouveau cas est alors ajouté à sa base (étape apprentissage).

L'exemple illustré par la fig. V.8, montre une situation d'interaction entre deux agents 1 et 2. Nous rappelons que le but de ce travail n'est pas de construire un protocole d'interaction entre les agents (en perspective). Néanmoins, nous avons imaginé que la conversation entre les deux agents sera gérée par un protocole inspiré de celui de Sian [Sian, 91]. Le protocole de Sian gère une conversation entre trois agents, ayant des connaissances concernant différents pays (l'Afrique, l'Amérique et l'Asie), qui tentent de prédire les prix des matières premières en fonction de différents facteurs. S. Sian donne un protocole de base qui peut être réutilisé pour des contextes plus divers.

<p>Agent 1 :</p> <p>Envoyer : <i>message</i>(03, Agent 2);</p> <p><i>message</i> (03) : Numéro : « 03 »</p> <p>Expéditeur : « Agent 1 »</p> <p>Destinataire : « Agent 2 »</p> <p>Nature : « <b>Requête</b> »</p> <p>Type : « Prioritaire »</p> <p>Etat : « Non Traité »</p> <p>Contenu : « je me trouve dans cette situation :</p> <p>Intention = respecter les rationalités</p> <p>Rationalité évaluative = Pas de retard pour client X</p> <p>Rationalité structurelle = pas d'augmentation de ressources</p> <p>Décision = appliquer le flux poussé</p> <p>Comment dois-je décliner cette directive »</p> <p>Date : « hh/mm/ss »</p>	<p>Agent 2 :</p> <p>Interpréter : <i>message</i>(03);</p> <p>Envoyer : <i>message</i>(04, Agent 1);</p> <p><i>message</i> (04) : Numéro : « 04 »</p> <p>Expéditeur : « Agent 2 »</p> <p>Destinataire : « Agent 1 »</p> <p>Nature : « <b>Réponse Requête</b> »</p> <p>Type : « Prioritaire »</p> <p>Etat : « Non Traité »</p> <p>Contenu : «Donner d'avantage d'information concernant le contexte (état du système dans lequel vous vous trouvez »</p> <p>Date : « hh/mm/ss »</p>
<p>Agent 1 :</p> <p><i>message</i> (05) : Numéro : « 05 ».....</p> <p>Contenu : « Niveau stock faible »</p>	<p>Agent 2 :</p> <p>Interpréter : <i>message</i>(05);</p> <p>Envoyer : <i>message</i>(06, Agent 1)...</p> <p>Contenu : « j'ai été dans un cas similaire, la directive qui a été prise est :</p> <p>Rationalité évaluative =Pas de retard pour X</p> <p>Rationalité structurelle = Modifier liste d'Ordre de Fabrication</p> <p>Décision = Liste d'OF validée (prévisionnelle)»</p>

Figure V. 8 : Exemple d'interaction entre agents

**affinage** de l'information et de la connaissance contenues dans les cas ; l'agent fait appel à d'autres agents, censés être compétents, pour étudier les contextes des cas les plus proches de celui du problème posé, ensuite discuter, étudier, et comparer les solutions des cas similaires, afin de suggérer une solution ; les discussions des agents sont fondées sur un ensemble d'heuristiques et de méthodes basées en général sur leurs connaissances du domaine (compétences).

**adaptation** et **révision** de cette solution par rapport au nouveau problème ; les échanges de connaissances sont très importants pendant cette étape car l'adaptation d'un cas en adoptant le transfert paramétrique d'éléments partiels de la solution vers le nouveau cas nécessite une très grande expérience.

**apprentissage**, avant d'intégrer un cas dans sa mémoire, l'agent peut discuter de la pertinence localement et globalement (conséquences de la solution proposée) de ce cas avec ses accointances.

## 5 DISCUSSION

Dans une organisation productive, les acteurs décisionnels se trouvent souvent confrontés à deux contraintes apparemment contradictoires : d'une part, diminuer le temps décisionnel, car le contexte industriel actuel oblige (réactivité, concurrence,...) et d'autre part, augmenter la fiabilité et la validité de la décision. En fait, il leur est demandé de prendre la meilleure décision en un minimum de temps.

Le système de raisonnement à partir de cas combiné avec la possibilité d'interaction avec l'environnement offre des réponses aux contraintes citées plus haut. En effet, la diminution du temps décisionnel résulte du fait que le système résout des problèmes à partir d'anciennes solutions, sans devoir recommencer le processus de construction de solutions du début.

Pour ce qui est de la fiabilité de la décision prise, l'agent, d'une part, se rappelle des expériences précédentes et évite de répéter des erreurs commises dans le passé, d'autre part, enrichie ses compétences via les interactions avec les autres agents du système.


Le module d'apprentissage proposé, s'appuie sur une structure d'indexation permettant un accès rapide aux cas et sur des mesures de similarité assurant une sélection des cas qui seront utilisés lors de l'affinage et de l'adaptation. L'étape d'apprentissage s'effectue en fin de cycle. Pendant ces différentes étapes, une possibilité de communication et d'interaction entre l'agent apprenant (lors de sa prise de décision) et ses accointances par le biais d'échange de messages.

Nous allons maintenant essayer de valider nos propositions, ce qui fera l'objet de la partie 3 (chap. VI et VII).



## **PARTIE 3 : APPLICATION**

### **EXPERIMENTATION ET VALIDATION**



Cette partie fournit, le cadre applicatif de notre travail. Elle décrit d'abord la manière dont la modèle MAC2 est implémenté, ensuite vérifie sa validité sur un exemple représentatif de la problématique industrielle des PME/PMI.



## CHAPITRE VI

### ARCHITECTURE LOGICIELLE DES MODELES MAC1 ET MAC2



*Notre démarche s'est essentiellement intéressée à la prise de décision dans les organisations productives, pour valider nos propositions, nous utilisons un modèle de simulation, développé au sein de notre équipe, pour représenter le système productif lui-même.*

*Après une introduction aux concepts et approches de simulation à événements discrets, nous allons étudier dans ce chapitre la manière dont l'architecture multi-agents des modèles MAC1 et MAC2 est implantée et simulée. Cette architecture est basée sur quelques outils d'implémentation que nous avons choisi en fonction de notre problématique.*





## 1 INTRODUCTION

Dan ce chapitre, nous présentons notre environnement de développement. Nous définirons tout d'abord, les outils utilisés Ilog Rules pour le raisonnement et SIM'2 pour la simulation du système de production. Nous utilisons un environnement qui combine la programmation par objets et les règles de production avec C++ comme langage de base. Nous présenterons ensuite, l'architecture d'implémentation de notre société d'agents, ainsi que la structure et le fonctionnement d'un agent de cette société.

## 2 LA SIMULATION

*« ..la simulation est une représentation de la réalité à travers un modèle, ou un autre moyen, qui réagira de la même manière que cette réalité sous des hypothèses définies ».*

*[Reed & Irwin, 61]*

*« ....elle a été utilisée pour comprendre un certain nombre de phénomènes par “ imitation” de phénomènes analogues, au moins dans l'extériorisation de leurs comportements... »*

*[Simon, 69]*

### 2.1 Introduction

La simulation est l'un des outils d'aide à la décision les plus efficaces à la disposition des concepteurs et des gestionnaires de systèmes complexes. Elle est l'une des méthodes les plus adaptées pour résoudre les problèmes posés par l'évaluation des performances de ces systèmes (problèmes de synchronisation, étude de comportement transitoires, etc..).

Elle consiste à construire un modèle d'un système réel et à conduire des expériences sur ce modèle afin de comprendre le comportement de ce système, d'en améliorer les performances, et d'appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques, dans l'objectif d'évaluer différentes décisions.

### 2.2 Complémentarité des SMA et de la simulation à événements discrets

La simulation à événements discrets est une technique de modélisation permettant de représenter un système dynamique en étudiant son évolution en fonction d'une succession d'événements datés. Elle a fait ses preuves depuis plusieurs années comme moyen adéquat pour étudier les systèmes complexes [Hill, 93].

A travers ce paragraphe, nous allons illustrer l'intérêt du couplage des systèmes multi-agents et de la simulation à événements discrets. G.I. Doukidis et R.J. Paul [Doukidis & Paul, 92] ont montré que l'on peut combiner la simulation à événements discrets et l'intelligence artificielle en utilisant des techniques d'apprentissage, des systèmes experts comme aide pour les projets de simulation, etc. Ces adjonctions ne sont pas toujours suffisantes pour les systèmes complexes tels que les systèmes industriels, la robotique, etc.. Pour modéliser ces systèmes, les systèmes multi-agents semblent plus appropriés.

Les systèmes multi-agents et la simulation à événements discrets ont quelques caractéristiques méthodologiques communes qui rend possible, en principe, leur intégration [Gessoum, 96] :

- Les deux approches modélisent des systèmes qui exécutent leurs activités de façon asynchrone et concurrente. Dans les domaines complexes, il est pratiquement impossible de regrouper toutes les tâches exécutées et de les sérialiser.
- Elles ont un contrôle distribué. Dans une organisation, il est impossible qu'une décision soit prise par une seule entité ou un seul groupe d'entité.
- Les deux disciplines peuvent simuler des systèmes en les modélisant indépendamment du niveau d'abstraction choisi.

La principale différence entre les deux approches réside dans l'approche temporelle, les techniques sous-jacentes aux systèmes multi-agents n'ont pas été développées afin de représenter et gérer leur comportement temporel, alors que la méthodologie de la simulation à événements discrets est particulièrement destinée à ce type d'étude par l'utilisation d'un échéancier (calendrier établi en fonction des dates d'événements).

Un autre point différencie les deux approches : Dans les SMA, on modélise les différentes entités du système et leurs interactions. On traite souvent des questions de type : quelle est la nature des connaissances et de l'intelligence représentées ? Est-il possible de programmer des composants qui coopèrent, qui coordonnent leurs actions et qui raisonnent ? Dans la simulation à événements discrets, on modélise les différents changements d'états du système à partir des changements d'états de ses différentes composantes.

Pour conclure, ces deux disciplines ont le même objectif, celui de fournir un outil pour étudier un ensemble d'entités interactives composant une structure complexe.

Dans ce mémoire nous allons utiliser un modèle de simulation développé au sein de l'équipe EMSI<sup>109</sup> à l'école des Mines de Saint Etienne. Ce modèle basé sur la simulation à événements discrets : SIM'2 s'intégrera dans une architecture globale que nous allons présenter dans le paragraphe suivant.

### 3 ARCHITECTURE LOGICIELLE

Pour implémenter et instancier les différents modèles proposés dans les chapitres précédents, nous avons défini une plate-forme informatique (fig. 1) interfaçant différents outils spécifiques et développements propres. Les outils sont Ilog Rules pour le raisonnement des agents sur l'expertise du domaine et SIM'2 pour la simulation du système de production. Ils seront détaillés dans les paragraphes suivants.

---

<sup>109</sup> EMSI : Etude et Modélisation des Systèmes Industriels

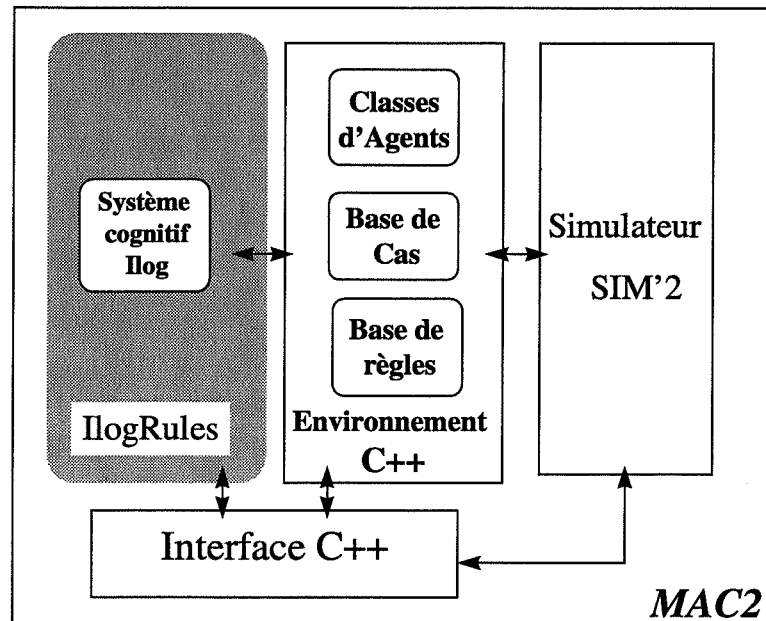


Figure VI. 1 : Architecture logicielle : MAC2

### 3.1 Modèle de simulation SIM'2

SIM'2 est un modèle de système de production intégré constitué de deux modules principaux : un module écrit en SIMAN<sup>110</sup> [Pegden, 90] représentant le système de production ; et un module écrit en C++ représentant l'environnement de ce système et l'interface utilisateur. Cette décomposition permet :

- une modélisation très fine du système de production grâce à l'utilisation d'un langage de simulation.

- la prise en compte de certaines décisions telles qu'un changement du nombre de ressources du système ou une modification d'une règle de gestion d'une file d'attente.

- l'introduction de deux types d'aléas, des aléas internes (rebuts, pannes, etc..), des aléas externes (variation de la demande du marché essentiellement).

Face à un marché potentiel, connu sur un certain horizon, l'utilisateur dispose de moyens de production (budget, ressources de transport, machines, informations, compétences, etc..). Il s'agit de gérer en prenant les décisions (à court et moyen terme) les plus appropriées tenant compte des aléas. Pour répondre à la complexité de certaines décisions, des outils de gestion peuvent être utilisés.

Les conséquences des décisions prises sont affichées sous forme de tableaux de bord allant du synthétique (résultats économiques, trésorerie), au plus détaillé (suivi d'exécution des ordres

<sup>110</sup> SIMAN est un langage de simulation général, constitué de deux parties indépendantes : - le modèle qui décrit les éléments physiques du système et les relations logiques entre ces éléments ; - le cadre expérimental (instance) spécifie les conditions qui vont guider la simulation du modèle. A partir d'un modèle et d'une instance, SIMAN produit un modèle instancié sur lequel portera la simulation.

de fabrication), en passant par d'autres résultats comme les niveaux de stocks, les temps de cycles, l'occupation des machines.

Un calendrier fixe les horaires de l'atelier, la périodicité des décisions et l'horizon perçu de la demande (non réactive). La représentation explicite des données de coûts (achats, machines, frais fixes, frais variables, frais financiers, ...) fonde la mesure de toutes les actions mises en jeu, elle offre notamment la possibilité de compléter l'analyse qualitative du système par des indicateurs de performance comptables.

Une session de travail est constituée de périodes (semaine de 40 h) consécutives. Au début de chaque période, l'utilisateur spécifie ses décisions puis active la simulation. En fin de période, SIM'2 fournit tous les résultats de la semaine écoulée. Le calendrier rythme la prise des décisions et la fourniture des résultats [Vincent, 95].

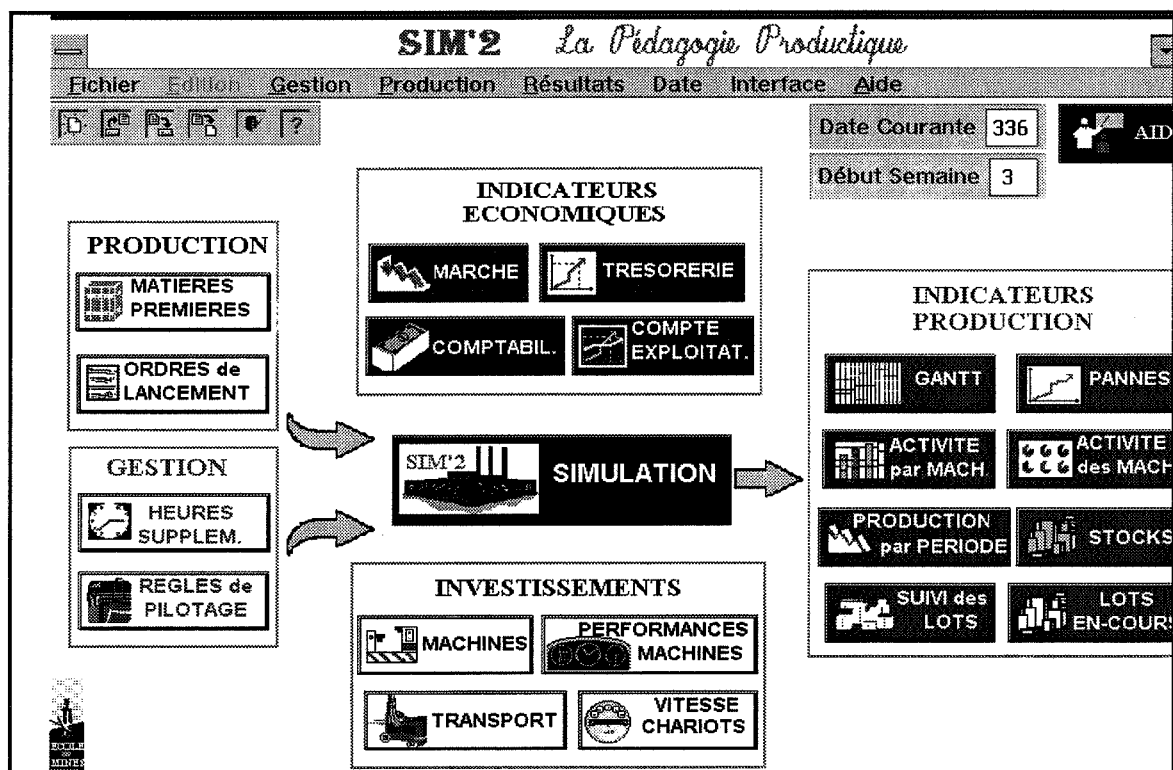


Figure VI. 2 : Interface de Gestion (Menus décisions, simulation, performances)

L'interface de gestion donne accès à la panoplie des décisions offertes (degrés de liberté du décideur) et des indicateurs de performance. Ces décisions, qui découlent de l'analyse du système et des orientations stratégiques retenues, relèvent de 3 classes :

- la production : les approvisionnements et les lancements en fabrication.
- le pilotage court terme : les règles de pilotage du flux et les horaires des postes de travail.
- le moyen et long terme : les investissements de capacité (achat d'une machine, doublement d'un poste de travail..) et les investissements d'amélioration de l'outil de production.

Une fois les décisions saisies, le décideur déclenche la simulation qui applique ces commandes au système dans son état courant : réception des achats, émission des lancements

alimentés, ouverture des postes de travail,..., pour la durée (période de jeu) prévue avant de rendre un nouvel état et les informations de résultats.

La performance à cette date est évaluée par des indicateurs « de production » (états des stocks, des lots, des machines...) et des indicateurs comptables: l'examen de ces données conduit le gestionnaire à définir de nouvelles décisions.

### 3.2 ILOG RULES

Ilog Rules (IR) est un générateur de systèmes à base de connaissances, développé par la société ILOG, fondé sur une représentation centrée-objet de la connaissance (fig. VI. 3). Il a été écrit en C++, le moteur d'inférence fonctionne sur l'algorithme RETE de C. L. Forgy [Forgy, 82]. IR opère uniquement en chaînage avant, un mode d'inférence qui consiste à partir des faits observés et à en déduire de nouveaux pour aboutir à une conclusion terminale.

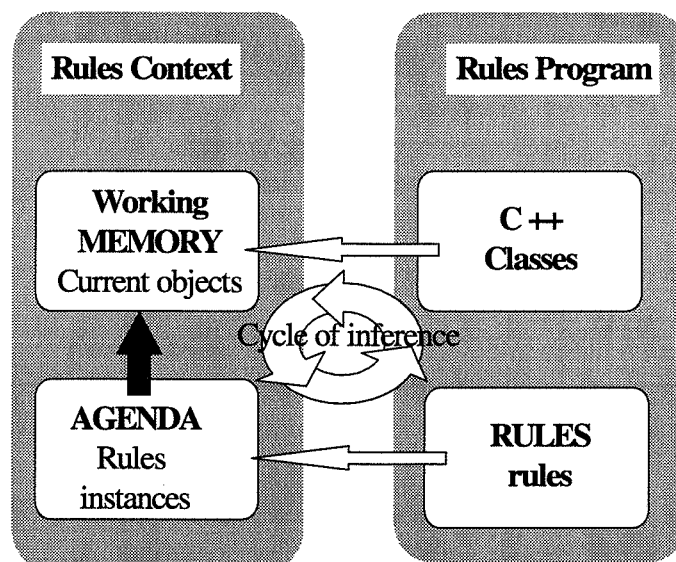


Figure VI. 3 : Ilog Rules

- **Working Memory** : contient tous les objets qui ont été créés.
- **Agenda** : contient l'ensemble des règles applicables sur ces objets.
- **C++ Classes** : contient la définition de tous les objets du domaine.
- **RULES** : contient l'ensemble des règles définies par l'utilisateur.
- **Cycle d'inférence** : mécanisme de fonctionnement : les règles dans l'agenda sont ordonnées suivant leurs priorités, la date de création des objets sur lesquels elles s'appliquent (récent-> ancien) et enfin leur position dans la source. Une seule règle est activée à la fois et elle est ensuite retirée de l'agenda pour permettre l'activation des autres règles. Cette règle sera réinsérée dans l'agenda si de nouveaux objets satisfont ces conditions.

Les règles, que l'on définit, s'appliquent directement aux objets du domaine ce qui donne à Ilog Rules une très grande flexibilité pour l'intégration de nouveaux objets.

IR utilise conjointement deux formalismes de représentation de la connaissance :

⇒ **représentation centrée- objet**, permet de mettre en évidence les éléments de la structure de la connaissance en autorisant une décomposition des connaissances de l'univers du discours en *objets*, *classes*, sous-classes et *propriétés*...

- **objet**, un objet Ilog Rules est un objet au sens du langage C++, c'est-à-dire une instance d'une classe C++, et qui correspond à une unité élémentaire de description.

- **classe**, une classe regroupe un ensemble d'instances qui partagent les mêmes propriétés. Elle est définie dans IR par son nom et ses propriétés. Une sous-classe est une classe qui représente une partie (elle partage les mêmes propriétés dont elle hérite) de classe de plus haut niveau.

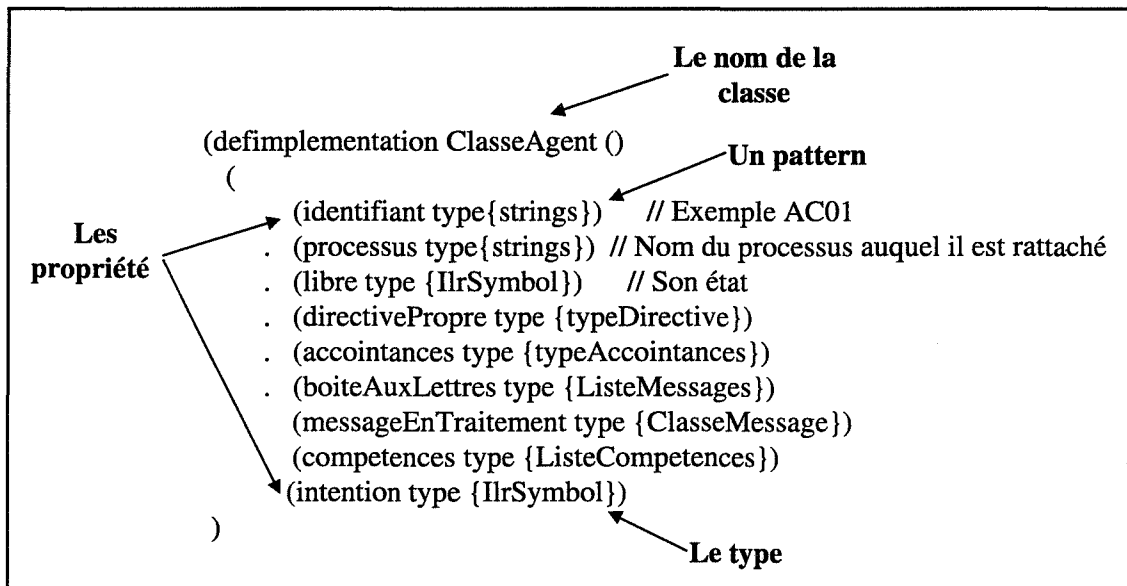


Figure VI. 4 : Exemple d'une classe

- **propriétés**, ce sont les caractéristiques des instances et des classes. Dans IR ces propriétés sont typées (chaînes de caractères, booléens, entiers...).

Dans la terminologie Ilog Rules les instances, les classes, et les propriétés sont représentées sous la forme d'une expression codée, appelée « pattern », désignant un ou plusieurs objets.

⇒ **règles de production** de la forme « Si...Alors » traduisent des inférences effectuées sur les éléments précédemment décrits. Elles se décomposent en trois parties : le **header**, partie **condition**, partie **conclusion**.

Exemples de règle, de conception et de raisonnement (cf. chapitre IV), tirés de la base de règle de l'agent Stratégique (cf. fig. VI. 5 et VI. 6), se traduisent par :

- Si l'agent stratégique a l'intention de pérenniser la clientèle, sachant que pour le faire il faut respecter les délais, et s'il a pour croyance que le concurrent respecte les délais avec un taux moyen > à 70%, alors l'agent doit les respecter à 70%+x (par exemple x=10).

```

(defpacket PConceptionDirectiveStr //Packet de règles de Conception de l'agent stratégique

Header (defrule CpOc1 default // CpOc1 : Compétence Opératoire de conception, règle n°1
Conditions {
    ?agent: (ClasseAgentStr intention = perenniser_clientele)
    (bind strings ?compet {?agent->_competence.attribut})
    {?compet != strings("respecter_delai")}
    {?agent->_croyance.attribut == strings("conc_respecte_delais")}
    (bind int ?val {?agent->_croyance.valeur})
    {?val > 70 && ?val < 100}
Conclusion -> {
    ?agent->_competence.attribut = "respecter_delai";
    ?agent->_competence.valeur = ?val + 10 ;}
    {cout << ?agent->getIdentifiant() << " " << ?agent->_competence.valeur << endl ;}
)

```

Figure VI. 5 : Exemple d'une règle de Conception de l'agent en Ilog

- Si l'agent stratégique a l'intention de pérenniser la clientèle, et s'il a comme compétence la gestion administrative des stocks alors la directive de sortie émise par le processus administratif sera : Rs = action possible sur le processus physique et interdite sur l'administratif ; Re = taux de service du client « Dupont » sera autour de 90% ; enfin une décision D = appliquer la méthode de gestion de stock.

```

(defpacket PRaisonnementStr //Packet de règles de raisonnement de l'agent stratégique
(defrule CpOr5 default // CpOr5 : Compétence Opératoire de raisonnement, règle n° 5
    ?agent: (ClasseAgentStr intention = perenniser_clientele)
    (bind Boolean ?comp_existe {?agent->getCompetence("methode_gest_adm_stock", -1)})
    {?comp_existe == True}
->
    {?agent->_directiveSortie.Rs = physique_non_adminis;
    ?agent->_directiveSortie.Re.attribut = "taux_service_cli";
    ?agent->_directiveSortie.Re.valeur = 90;
    ?agent->_directiveSortie.Re.client = "Dupont";
    ?agent->_directiveSortie.decision = methode_gestion_stock;
    }
)
...

```

Figure VI. 6 : Exemple d'une règle de raisonnement de l'agent en Ilog

Les règles doivent être regroupées à l'intérieur d'un ensemble « set » et de sous ensembles « packets » qui permettent d'accélérer la recherche, les inférences, et l'accès aux connaissances. Ces « packets » de règles peuvent être activés ou désactivés à volonté. Ce mécanisme autorise la conception de tâches dédiées à traiter un sous problème particulier (fig. VI. 7).



```

(defruleset SAgents
  (defpacket PConceptionStr
    (defrule regle1 default
      .....
      ->
      ....)
    (defrule regle2 default
      ->
      ....))
  (defpacket PRaisonnementnStr
    (...
     ...))
)

```

Figure VI. 7 : Exemple de « packet » de règles de l'agent Stratégique

#### 4 IMPLEMENTATION DU MODELE D'AGENTS MAC2

Les agents cognitifs pilotent des centres d'activités qui représentent des processus opérationnels de l'entreprise, et qui sont eux mêmes des processus actifs (au sens temporel du terme). Il faut donc avoir la possibilité de gérer non seulement la cohérence des interactions entre agents, mais également le pilotage des centres d'activités par ces agents et leur synchronisation.

L'environnement de développement étant un environnement objet, la structure des agents est déterminée par un ensemble de champs, qui ont pour valeur des objets qui représentent les composants de l'agent (les bases de connaissances, la boîte aux lettres, etc.) ou qui déterminent une configuration de l'agent (l'état, les données, etc.). Ces champs peuvent être regroupés en fonction de leur contribution à l'implémentation des différents modules (perception, communication, contrôle (formalisation, conception, raisonnement), etc.) des agents.

La modélisation par objets conduit à décomposer un système en classes d'objets. Un modèle orienté objet d'un système distribué peut être vu comme un ensemble d'objets, pouvant être actifs simultanément et communiquant les uns avec les autres aux moyens de messages. Un modèle d'implémentation orienté objets répondant aux principes fondamentaux des agents doit donc [Ouzrout, 96] :

- Transformer les objets en objets actifs (qui encapsulent des processus).
- Prendre en compte l'asynchronisme des événements : cela peut se faire comme dans les langages d'acteurs, au moyen d'une boîte aux lettres et d'un gestionnaire de boîte.
- Définir des types de messages, et des protocoles de communication.
- Permettre une représentation des connaissances (croyances, intentions, compétences, etc.) et des mécanismes de traitements adéquats (procédures, règles de production, etc.).
- Intégrer un mécanisme de régulation qui permettra l'activation en parallèle de chaque agent, et de vérifier la cohérence de leurs évolutions temporelles.

## 4.1 La classe générique « Agent »

Différents types d'agents sont à considérer (administratifs, stratégiques, opérateurs, ...) dans notre modèle d'organisation productive. Ils possèdent tous la même taxonomie et ne se différencient que par leurs connaissances. De ce fait, la représentation qui convient au mieux à cette situation est de factoriser les propriétés et les parties communes des traitements au niveau d'une classe de base, que nous appelons *agentGen*, puis ces différentes classes hériteront des propriétés et des traitements de la classe mère *agentsGen*.

Ainsi, nous proposons la hiérarchie suivante, image de l'héritage appliqué aux différentes classes d'agents (fig. VI. 8) :

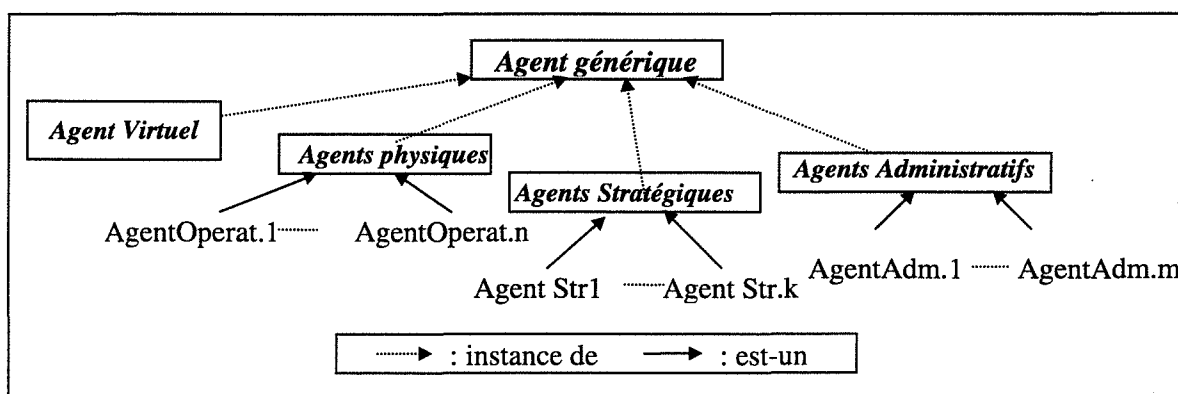


Figure VI. 8 : Hiérarchie d'agents

Les agents possèdent une liste d'attributs (fig. VI. 9) : identifiant, processus, accointances, état, boîtes aux lettres, compétences, etc. et un ensemble de méthodes de communication, perception, formalisation, conception, raisonnement, etc. qui correspondent à l'ensemble des méthodes et fonctionnalités définies dans MAC2 (cf. chap. IV et V).

Avant de voir la description de la classe agent, il est à noter que les descriptions utilisées sont données selon une syntaxe proche du C++ où les expressions délimitées par /\* et \*/ sont des commentaires. Ainsi, la classe représentant le modèle de l'objet agent générique est la suivante (fig. VI. 9):

```

class ClasseAgentGen
{
    String identifiant ;      /* identifiant de l'agent. Exemple AC01, String étant le type
                               chaîne de caractères */

    String processus ;       /* Nom du processus auquel l'agent est rattaché */

    boolean etat ;           /* Booléen indiquant l'état de l'agent : Libre ou Occupé */

    typeIntention intention ; /* Intention de l'agent où typeIntention est l'ensemble de
                               valeurs suivantes : respect_Re, non_respect_Re,
                               augment_chiff_affaire, pereniser_clientele,
                               augmenter_rentabilite, faire_zele */

    typeCroyance croyance ;   /* Croyance de l'agent. Pour typeCroyance, (cf. ci dessous) */

    typeDirective directivePropre ; /* typeDirective est le type composé de : Re, Rs &
                                     Décision. directivePropre est un triplet (Re, Rs, Décision) que
                                     l'agent a reçu d'un autre agent de niveau supérieur */

    typeDirective directiveSortie ; /* directive produite par l'agent en direction d'un ou
                                     plusieurs agents de niveau inférieur */

    ListeCompetences competences ; /* Liste des compétences possédées par l'agent */

    ListeMessages boiteAuxLettres ; /* Liste (pile FIFO avec gestion de priorité) des
                                     messages que l'agent reçoit de son entourage. Les messages
                                     sont stockés et traités dans l'ordre de leur priorité et
                                     importance*/

    ClasseMessage messageEnTraitement ; /* message en cours de traitement par l'agent,
                                     extrait de sa boîte aux lettres */

    typeAcointances acointances ; /* Liste des agents que l'agent doit connaître. */

    typeEngagements engagements ; /* Liste des engagements de l'agent où
                                     typeEngagements est une liste de typeDirective */
}
    
```

Figure VI. 9 : Liste des attributs de la classe Agent générique

A l'exception des trois premiers attributs (identifiant, processus et état) qui sont de types élémentaires, les autres attributs de la classe *AgentGen* sont des attributs composites c'est-à-dire attribut-valeur ou liste d'attributs-valeurs. TypeCroyance par exemple, est une structure attribut-valeur comme indiqué ci-dessous :

```

struct typeCroyance;
{
    String attribut;    /* Nom de la croyance */
    float valeur;      /* Pourcentage représentant la valeur (degré) de la croyance */
}
    
```

Quant aux directives, ce sont des structures combinant trois attributs : i) Rationalité évaluative ; ii) Rationalité structurelle ; iii) Décision. Voici la structure de typeDirective :

```
struct typeDirective
{
    typeRs Rs ;          /* Où typeRs est l'ensemble de valeurs possibles pour la
                           rationalité*/
    typeRe Re ;          /* rationalité évaluative, typeRe est défini juste après */
    typeDecision decision ; /* Où typeDacision est l'ensemble de valeurs possibles des
                           décisions qu'un agent peut prendre */
}

struct typeRe
{
    String attribut;     /* taux_serv_client, satisfaction_client, productivite */
    String client;       /* seulement si taux_serv_client, satisfaction_client */
    float valeur;
}
```

Comme mentionné plus haut, ListeCompetences est une liste dont les éléments sont de type typeCompetence défini comme suit :

```
struct typeCompetence
{
    String attribut;     /* Nom de la compétence */
    float valeur;       /* La valeur (taux) de la compétence */
}
```

L'attribut boiteAuxLettres quant à lui est une liste d'objets messages instances de la classe *ClasseMessage* décrite ci-dessous :

```
class ClasseMessage
{
    typeNatureMessage nature; /* Où typeNatureMessage spécifie l'ensemble de
                               valeurs possibles désignant la nature du message :
                               directive, requête, information, ...*/

    ClasseAgent agentExpéditeur; /* référence de l'agent expéditeur du message */

    typePriorite priorite;      /* Où typePriorite est l'ensemble de valeurs désignant la
                               priorité attachée au message : urgent, prioritaire, normal
                               */

    Union { typeDirective directive ; String requete; }
           /* contenu du message qui peut être soit une directive
           soit une chaîne de caractères qui constitue une requête
           ou une réponse à une requête */
}
```

Enfin, typeAccointances qui désigne l'ensemble des agents qui sont en contact direct avec un agent est défini de la manière suivante :

```

struct typeAccointances
{
    ClasseAgent Agent_sup ;           /* Référence à l 'agent du niveau supérieur */
    ListeAgents agents_inf ;          /* Liste des agents de niveau inférieur */
    ListeAgents agents_equivalents ; /* La liste des agents de même niveau */
}
    
```

## 4.2 Fonctionnalités de l'agent

L'agent est doté de modules qui décrivent son comportement, c'est-à-dire les traitements, le raisonnement, la communication inter-agents et la perception de l'environnement. Nous allons reprendre la description des agents dans MAC2, en nous intéressant à la manière dont ces différents modules sont synchronisés et implémentés.

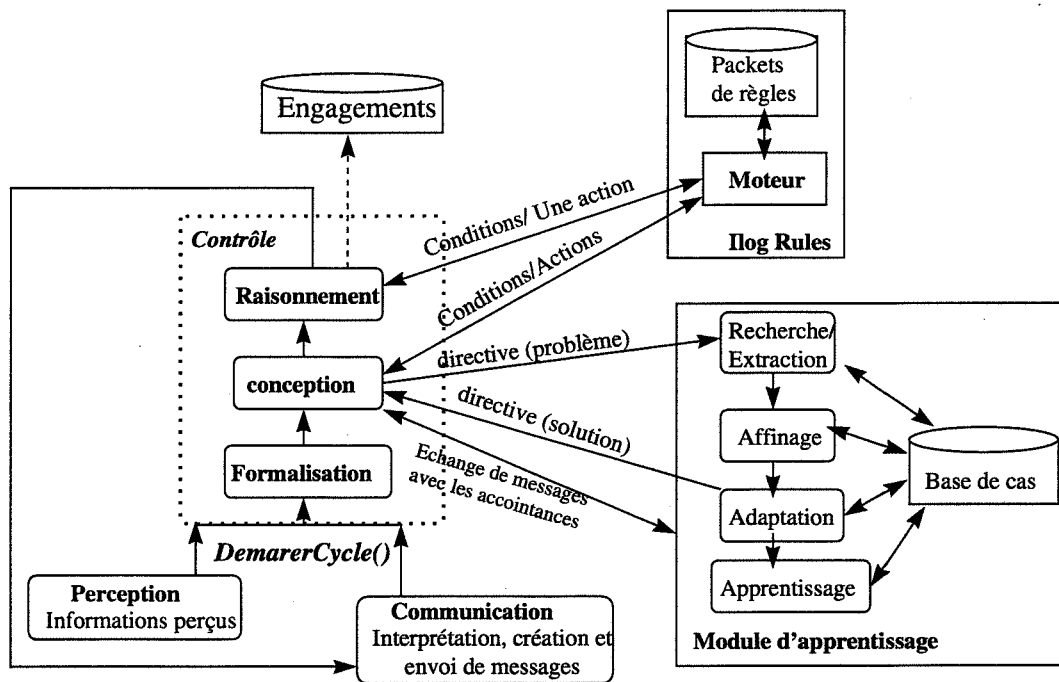


Figure VI. 10 : Le fonctionnement de l'agent dans MAC2

La fonction **DemarrerCycle()**, décrite ci dessous, déclenche le fonctionnement de l'agent, elle est initiée par la perception d'un événement ou l'arrivée d'un message. Les agents peuvent accéder aux boites aux lettres de leurs accointances, ainsi ils peuvent déposer des messages :

```

ClasseAgent::DeposerMessage(ClasseMessage message)
{
    boiteAuxLettres.Push(message);
    /* Push est une fonction de la librairie de la classe Pile permettant
    d'empiler l'élément en paramètre (ici message) dans la pile des
    messages
    boiteAuxLettres de l'agent */
    DemarrerCycle();
}
    
```

```

DemarrerCycle();
{
    /* Un agent travaille en cycles. */

    Tant qu'il y a un message dans boîteAuxLettres
        Faire
            messageEnTraitement = boîteAuxLettres.Pop();
            /* Pop est une fonction de la librairie de la classe Pile permettant
               d'obtenir le premier élément de la pile des messages contenus dans
               boîteAuxLettres de l'agent */

            Si messageEnTraitement.nature = directive OU perception = VRAI
                /* Si le message à traiter est une directive ou bien si un événement est
                   perçu (perception = vrai)
                Alors
                    Perception();
                Fin Si
            Formalisation();
            Conception(messageEnTraitement.nature);
            Raisonnement();
            Communication();
        Fin Tant que
    }

```

Une fois que la méthode **Formalisation()** a déterminé la nature du message, elle active la méthode **Conception(messageEnTraitement.nature)**.

Si la nature du message est une directive, la méthode Conception, dont l'algorithme est décrit ci-dessous, va dans un premier temps, déclencher le module d'apprentissage, plus exactement le raisonnement à partir de cas (fig. VI. 10) pour lui trouver une solution (une directive déclinée). Si la réponse est négative (pas de solution), la méthode va activer Ilog Rules pour lui inférer une solution.

```

Conception(natureMessage)
{
    Si natureMessage = directive
        Alors /* activation du cycle de raisonnement à partir de cas */
            DemarrerCycleCbr();
            /* Exécuter la base des connaissances de conception pour les directives
               PConceptionDirective (dans Ilog Rules) dans le contexte de l'agent */
        Sinon
            context->activatePacket(PConceptionDirective);
            context->firePacket(PConceptionDirective);
        Sinon
            Si natureMessage = requête
                Alors /* Exécuter la BC de conception pour les requêtes (PConceptionRequete) */
                    context->activatePacket(PConceptionRequete);
                    context->firePacket(PConceptionRequete);
                Sinon /* Exécuter la BC de conception pour les réponses aux requêtes */
                    .....
            Fin Si
        Fin Si
    }

```

```

Raisonnement()
{
    /* Exécuter la base de connaissances pour le raisonnement (PRaisonnement)
    */
    context->activatePacket(PRaisonnement);
    context->firePacket(PRaisonnement);

    /* Sauvegarder le résultat du raisonnement (Engagement) */
    engagements.Inserer(directiveSortie) ;
    /* Inserer est une fonction de la librairie de la classe Liste permettant
    d'insérer l'élément en paramètre (en occurrence directiveSortie)
    dans la liste concernée (ici engagements) */
}

```

La méthode *Communication()* (ci-dessous) se charge de répondre aux messages que l'agent reçoit. Après avoir reçu un message, l'agent déclenche les traitements nécessaires pour y répondre. Ce traitement achevé, la méthode récupère le résultat, construit un nouveau message et l'envoie à un agent en le déposant dans sa boîte aux lettres.

```

Communication()
{
    /* Construire un nouveau message dont le contenu est le résultat obtenu par le raisonnement
    */

    ClasseMessage message ;
    message.Expediteur = this ;          /* l'expéditeur du nouveau message est l'agent
    courant */
    Si (messageEnTraitement.nature = requete)
        Alors
            message.nature = reponseRequete;

            /* Envoyer le message à l'expéditeur du message en traitement. L'envoi de
            message se fait par appel à la fonction DeposerMessage membre de
            ClasseAgent */

            messageEnTraitement.agentExpediteur.DeposerMessage(message);
        Sinon
            Si le message en traitement est une directive
                Alors
                    /* Mettre la nature du message à retourner à directive */
                    message.nature = directive ;

                    /* Envoyer le message à tous les dépendant de l'agent */
                    ClasseAgent agent = _accountances.agents_inf.Head();
                    /* Head est une fonction de la librairie Liste donnant son premier élément
                    */

                    Tant que agent est valide
                        Faire
                            agent.DeposerMessage(message) ;
                            agent = accountances.agents_inf.Next(agent);
                            /* Passer à l'agent suivant de la liste accountances.agents_inf
                    */

    Fin Tant que

```

### 4.3 Raisonnement à partir de cas

Comme nous l'avons souligné au chapitre V, une partie du raisonnement des différents agents est basée sur le raisonnement à partir de cas. Ce raisonnement est amorcé par le module conception via la fonction **DemarrerCycleCbr()**; cette dernière déclenche les fonctions suivantes, dont quelques unes seront détaillées plus loin :

*RechercherStricte(casATrouver)*, *SimGlobale(ancienCas,nouveauCas)*, *SimLocale(Descripteur1, Dsripteur2)*, *Affiner(ancienCas, nouveauCas)*, *Adapter(ancienCas, nouveauCas)*, *Remplacer(ancienCas, nouveauCas)*, *Inserer(nouveauCas)*, etc..

Le raisonnement à partir de cas utilise une mémoire organisée en cas dans laquelle sont stockés les différents cas que l'agent connaît par défaut ou a acquis par apprentissage. L'organisation de cette mémoire est telle qu'elle permet un accès rapide à tout cas déjà rencontré. Pour ce faire, un système d'indexation est utilisé. Il est basé d'une part sur des informations pertinentes extraites des cas eux-mêmes ; et d'autre part sur des heuristiques disponibles dans le contexte courant de l'agent.

En effet, les différents cas peuvent être répertoriés en sous ensembles selon les descripteurs les plus discriminants comme par exemple *Intention*. Chacun de ces sous ensembles peut être référencé d'une manière unique par un ensemble d'index comme les *Directives* par exemple.

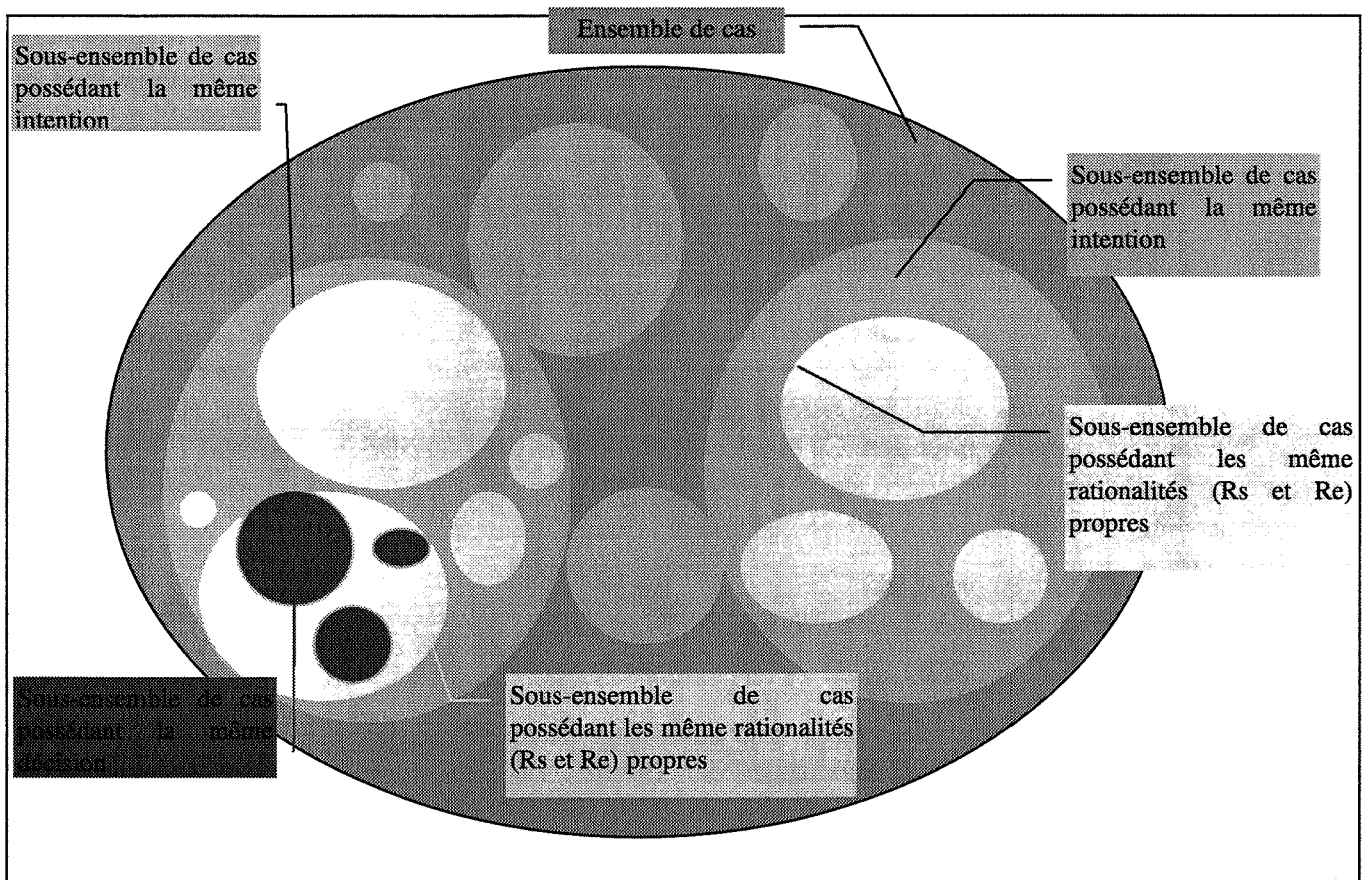




Figure VI. 11 : Classification des cas selon les index intention, rationalités et décision

De ce fait, une structuration en arbre à quatre (nombre des descripteurs discriminants) niveaux est jugée plus adéquate pour représenter une telle mémoire. Les feuilles de l'arbre sont les cas. Les différents autres niveaux supérieurs de l'arbre sont indexés par les descripteurs permettant, d'un côté, le raffinement des recherches des cas, et d'un autre côté, la comparaison de la nouvelle situation aux cas de l'arborescence. L'arbre est doté de fonctions permettant son exploitation : parcours, recherche et extraction, affinement, adaptation, ajout de nouveaux cas, suppression et mise à jour de la base de cas, etc.

Ainsi, les cas sont alors représentés par des entités (nommées *ClasseCas*) renfermant un ensemble de données exploitables par le processus de raisonnement à partir de cas, déclenché par le module conception, dont la structure est la suivante :

```

classe ClasseCas
{
    typeIntention intention;
    typeRe RePropre;
    typeRs RsPropre;
    typeCroyance croyances;
    typeDirective directiveAdministrative;
    typeDirective directivePhysique;
    float indicateur;           /* retour de la simulation */
    String appreciation;      /* pondération du cas de App « bon » ou « mauvais »
}
    
```

Les cas constituent les feuilles de l'arbre des cas, ils sont accessibles par un parcours depuis la racine de l'arbre qui donne sur le premier niveau :

```

classe ArbreCas
{
    ListeEntitesNiveau1 entitesNiveau1;    /* Liste d'entités de type ArbreNiveau1 */
}
    
```

Ce premier niveau renferme le premier critère de classification des cas qui est *l'intention*, permettant de regrouper les cas en sous ensembles où les cas d'un même sous-ensemble possèdent la même intention. Ce niveau est représenté par l'entité *ArbreNiveau1* :

```

class ArbreNiveau1
{
    typeIntention intention ;
    ListeArbreNiveau2 entitesNiveau2;
}
    
```

ListeArbreNiveau2 est le type de liste des entités de niveau 2 (*ArbreNiveau2*). Ce dernier est une entité composée de deux types de données. Le premier renferme des références au troisième niveau de l'arbre et le second est le deuxième index de classification des cas c'est-à-dire les rationalités évaluative et structurelle propres. La structure d'une telle entité est comme suit :

```

classe ArbreNiveau2
{
    typeRe RePropre ;
    typeRs RsPropre ;
    ListeArbreNiveau3 entitesNiveau3;
}

```

Le troisième niveau de l'arbre est formé d'entités de type *ArbreNiveau3*. Chacune de ces entités se compose de deux types de données. Le premier renferme des références aux différents cas et le second est l'index décision permettant un dernier raffinement de classification des cas. Voici la structure correspondante :

```

classe ArbreNiveau3
{
    typeDecision decision ;
    ListeCas cas ; /* liste de cas possédant la même décision, les mêmes rationalités et la même intention */
}

```

Ainsi, l'arbre des cas, nommé *arbreCas*, est une instance de la classe *ArbreCas*. L'exploitation de cet arbre de cas est assurée par un ensemble de fonctions membres de la classe *ArbreCas*, nous allons décrire quelques unes :

---

***RechercherStricte(casATrouver)***

```

{
    ArbreNiveau1 ptr1 = entitesNiveau1.Head();
    Tant que (ptr1 est valide)
        Faire
            Si (ptr1.intention = casATrouver.intention)
                Alors
                    break; /* On a trouvé la bonne branche de l'arbre à exploiter */
                Fin Si
            ptr1 = entitesNiveau1.Next(ptr1);
        Fin Tant que
    Si (ptr1 est non valide)
        Alors
            return 0; /* C'est un échec de la recherche */
        Fin Si
    ArbreNiveau2 ptr2 = ptr1.entitesNiveau2.Head(); /* Travailler avec la branche valide à exploiter ptr1 */
    Tant que (ptr2 est valide)
        Faire
            Si (ptr2.RePropre = casATrouver.RePropre
                AND ptr2.RsPropre = casATrouver.RsPropre)
                Alors
                    break; /* Une branche à exploiter est trouvée */
                Fin Si
            ptr2 = ptr1.entitesNiveau2.Next(ptr2);
        Fin Tant que
    Si (ptr2 est non valide)
        Alors

```

```

        return 0;      /* Echec de la recherche */
    Fin Si
    ArbreNiveau3 ptr3 = ptr2.entitesNiveau3.Head(); /* Travailler avec la branche valide à
exploiter ptr2 */
    Tant que (ptr3 est valide)
        Faire
            Si (ptr3.decision = casATrouver.decision)
                Alors
                    break;      /* Une branche à exploiter est trouvée */
                Fin Si
            ptr3 = ptr1.entitesNiveau2.Next(ptr3);
        Fin Tant que
    Si (ptr3 est non valide)
        .....
        ClasseCas ptr4 = ptr1.cas.Head() ;
        Tant que (ptr4 est valide)
            Faire
                Si (ptr4 = casATrouver)
                    Alors
                        break;      /* Une branche à exploiter est trouvée */
                    Fin Si
                ptr4 = ptr3.entitesNiveau2.Next(ptr4);
            Fin Tant que

    return ptr4;
}

```

---

Outre cette fonction de recherche **RechercherStricte(casATrouver)**, qui consiste à chercher un cas solution identique au cas problème, une autre fonction de recherche est implémentée, elle est basée sur le calcul des similarités globales **SimGlobale(ancienCas, nouveauCas)** entre les cas, en s'appuyant sur le calcul des similarités locales des descripteurs **SimLocale(Intention1, Intention2)** (le descripteur ici est l'intention).

Une fois achevé le calcul de similarité, un ensemble de cas sera affiné par la fonction **Affiner(ancienCas, nouveauCas)**. Cette fonction déclenche la fonction **SimLocale(Contexte1, Contexte2)**, ensuite la fonction **Comparer(Ind1, Ind2)** pour évaluer le degré de satisfaction de l'objectif (rationalité évaluative). Le cas, correspondant à la plus forte similarité des contextes, ainsi qu'au meilleur indicateur Ind, sera retenu.

La fonction **Affiner(ancienCas, nouveauCas)** va déclencher soit la fonction **Adapter(ancienCas, nouveauCas)** soit les fonctions **Remplacer(ancienCas, nouveauCas)** ou **Inserer(nouveauCas)** (Apprentissage) en se basant sur les résultats de la fonction **Comparer(Ind1, Ind2)** (cf. chap.V.§3.3).

La fonction **Inserer(nouveauCas)** est détaillée ci-dessous :

---

```

Inserer(nouveauCas)
{
    Si (RechercherStricte(nouveauCas) = VRAI)
        Alors
            return ;      /* Si le cas à insérer est déjà dans l'arbre, alors on ne fait rien */
        Fin Si
}

```

---

```

ArbreNiveau1 ptr1 = entitesNiveau1.Head();
Tant que (ptr1 est valide)
    Faire
        Si (ptr1.intention = nouveauCas.intention)
            Alors
                break;
            Fin Si
        ptr1 = entitesNiveau1.Next(ptr1);
    Fin Tant que

Si (ptr1 est non valide)
    Alors /* Construire une nouvelle arborescence pour le nouveau cas */
        entitesNiveau1.Nouveau(nouveauCas)
    Sinon /* Chercher l'arborescence au second niveau */
        ArbreNiveau2 ptr2 = ptr1.entitesNiveau2.Head();
        Tant que (ptr2 est valide)
            Faire
                Si (ptr2.RePropre = nouveauCas.RePropre
                    AND ptr2.RsPropre = nouveauCas.RsPropre)
                    Alors
                        break;
                    Fin Si
                ptr2 = ptr1.entitesNiveau2.Next(ptr2);
            Fin Tant que

Si (ptr2 est non valide)
    Alors /* Construire une nouvelle arborescence pour le nouveau cas */
        ptr1.entitesNiveau2.Nouveau(nouveauCas)
    Sinon /* Chercher l'arborescence au troisième niveau */
        ArbreNiveau3 ptr3 = ptr2.entitesNiveau3.Head();
        Tant que (ptr3 est valide)
            Faire
                Si (ptr3.decision = nouveauCas.decision)
                    Alors
                        break;
                    Fin Si
                ptr3 = ptr2.entitesNiveau3.Next(ptr3);
            Fin Tant que

Si (ptr3 est non valide)
    Alors /* Construire créer une feuille cas */
        ptr2.entitesNiveau3.Nouveau(nouveauCas)
    Sinon
        ptr3.cas.Append(nouveauCas);
    Fin Si
}

```

---

## 5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, l'implémentation du Modèle d'Agents Cognitifs MAC2 a été décrite. Nous nous sommes placés dans le cadre de la programmation par objets dont les fondements

résident, entre autre, dans l'encapsulation au sein d'une même entité (classe) des caractéristiques décrivant un concept.

L'architecture informatique proposée permet de représenter les différentes phases du contrôle (formalisation, conception,...), du raisonnement (classique : règle de production, CBR,...), et des interactions des agents cognitifs. Pour la valider, nous allons l'appliquer à un cas industriel réel.

## CHAPITRE VII

### EXPERIMENTATION ET VALIDATION INDUSTRIELLE



*Dans ce chapitre, nous allons illustrer, sur un exemple représentatif de la problématique industrielle des PME/PMI, la démarche que nous avons mise en oeuvre pour valider les concepts définis dans les chapitres précédents.*



## 1 INTRODUCTION

Nous allons à présent valider le modèle des organisations productives que nous avons construit aux chapitres précédents. Nous allons utiliser le modèle Méta2 pour représenter le cas réel d'une entreprise industrielle engagée dans un projet productique visant à reconfigurer ses processus principaux selon une démarche d'intégration et de flexibilité. A partir de cette représentation, nous validerons notre modèle d'agent MAC2 qui permet de représenter la dynamique des comportements des organisations productives.

Nous présentons d'abord l'entreprise industrielle que nous avons retenue, nous décrivons ensuite les processus de cette entreprise selon Méta2. Puis, nous détaillerons les différents agents qui constituent le modèle de simulation. Enfin, nous définirons les différents scénarios mis en oeuvre pour valider le modèle, et nous finirons par exposer les résultats des expériences de simulation, et montrer en quoi notre système peut améliorer la compréhension du fonctionnement des organisations productives.

## 2 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE E

### 2.1 L'entreprise et son environnement

Pour mettre en application notre modèle théorique de représentation sur une situation productique réelle, nous avons retenu le cas de l'entreprise E qui nous paraît représentatif du nouveau contexte industriel décrit au chapitre I. Cette entreprise industrielle est dans une situation de mutation organisationnelle qui s'exprime clairement par un mouvement vers la flexibilité et vers l'intégration.

L'entreprise E emploie une centaine de personnes, elle a développé depuis le début du siècle une activité centrée sur le métier de la découpe et de l'assemblage de pièces de tôlerie. Elle est actuellement spécialisée dans la fabrication de réservoirs métalliques à carburant pour véhicules industriels.

Le marché des réservoirs à carburant pour véhicules industriels est un marché de biens intermédiaires, et l'entreprise E vend ses produits en première monte et comme pièces de rechange à une clientèle industrielle. Dans la pratique, un client prépondérant, représente les deux tiers du chiffre d'affaires. Le comportement de l'entreprise E. est donc fortement influencé par les exigences industrielles de ce premier client.

Les volumes de fabrication annuels sont de l'ordre de 60 000 produits, ce qui classe l'entreprise dans le secteur de la moyenne série (environ 300 produits sont fabriqués chaque jour), pour ce type d'activité ; la gamme commerciale est d'autre part assez large puisque le catalogue propose une centaine de références différentes par leurs dimensions, leur matière (acier, aluminium), et leurs accessoires. Cette gamme est elle-même renouvelée chaque année pour environ 20 % des références. Le processus de fabrication se décompose en trois étapes :

- la préparation des tôles (cisailage, découpe, poinçonnage, emboutissage et détournage) ;



- l'assemblage, essentiellement par soudage, qui comprend un nombre important de postes associés à l'utilisation de techniques différentes ;
- le traitement de surface.

La gestion de production est assistée par un système d'information fondé sur le concept MRP (Manufacturing Resource Planning ou Material Requirement Planning [Orlicky, 75]). La figure VII. 1 représente le flux physique et le système d'information qui l'anime, présentés selon la vision traditionnelle différenciant les systèmes d'information-décision du système physique.

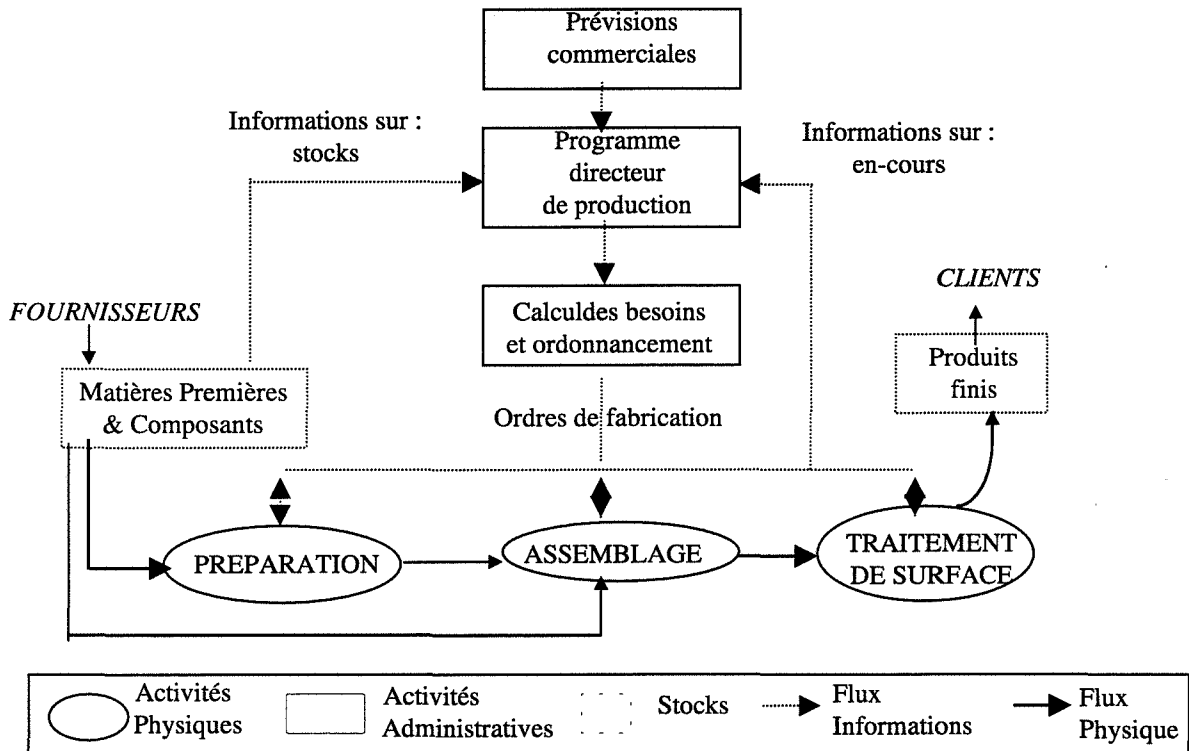


Figure VII. 1 : Flux de fabrication et du système de gestion de l'entreprise E

Dans cette structure, nous retrouvons la chaîne décisionnelle qui décline les prévisions commerciales en programme de production, puis en ordres de fabrication à partir d'un calcul des besoins et d'un module d'ordonnancement informés sur l'état des stocks et des en-cours.

## 2.2 Contexte Industriel

Le marché de l'entreprise E a suivi les évolutions récentes des marchés industriels caractérisées par des exigences croissantes non seulement sur les prix, mais également sur la qualité, le délai et la variété, ce qui a poussé l'entreprise E à modifier son processus de fabrication. Elle a en particulier pris l'engagement vis-à-vis de ses clients de baisser les prix de vente de ses produits, d'améliorer sa flexibilité donc ses délais et d'intégrer la phase de conception des produits dans son savoir-faire.

Des changements organisationnels importants ont donc été formalisés en son sein par un projet productique stratégique dont les objectifs sont : la réduction du délai entre l'arrivée d'une commande et la livraison du produit, la flexibilité, la réduction des coûts de production, et la diminution des arrêts machines par maintenance préventive.

Notons que la volonté de réduire les arrêts machines par une politique de maintenance préventive répond à deux préoccupations puisqu'elle peut à la fois mener à une réduction des coûts de revient (notamment en évitant les heures supplémentaires nécessaires pour rattraper les périodes d'indisponibilité des machines) et mener à une meilleure maîtrise des délais.

Ce contexte, s'il est illustré par l'entreprise E, est représentatif de l'évolution d'un grand nombre de petites entreprises de sous-traitance, très présentes en Région Rhône Alpes.

Pour illustrer les changements envisagés par cette entreprise, nous entamons la mise en oeuvre du processus de modélisation.

### 3 DESCRIPTION DU MODELE DE SIMULATION

Nous allons à présent décrire l'entreprise E au moyen du modèle Méta2 (chap. I, § 5). Nous commençons par identifier et détailler les différents processus de l'organisation : processus stratégique, processus de traitement d'informations, et processus de transformation physique.

#### 3.1 Processus stratégique

Le processus stratégique représenté (fig. VII. 2) regroupe les actions de transformation réalisées sur le processus opérationnel de traitement d'informations, et sur le processus opérationnel de transformation physique. Ce processus stratégique sera naturellement décrit par le couplage du module de décision formalisé et du module regroupant ces deux processus opérationnels. Ce processus va guider et orienter les transformations profondes de l'entreprise en améliorant les processus opérationnels.

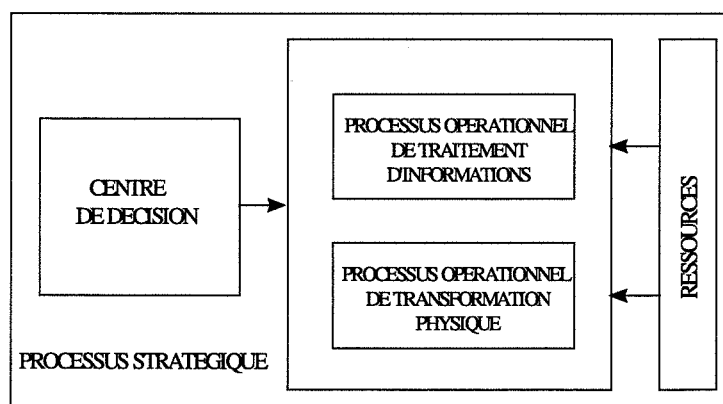


Figure VII. 2 : Modélisation du processus stratégique de l'entreprise E

### 3.2 Processus opérationnel de traitement d'informations

Le processus administratif de traitement d'informations (fig. VII. 3) se charge de transformer les prévisions commerciales et les commandes clients en ordres de fabrications. Il est représenté par un couple formé d'une chaîne d'activités et d'un centre de décision qui la pilote. La chaîne d'activités est elle-même formée de couples de niveau inférieur, constitués chacun par un centre d'activités et par un centre de décision.

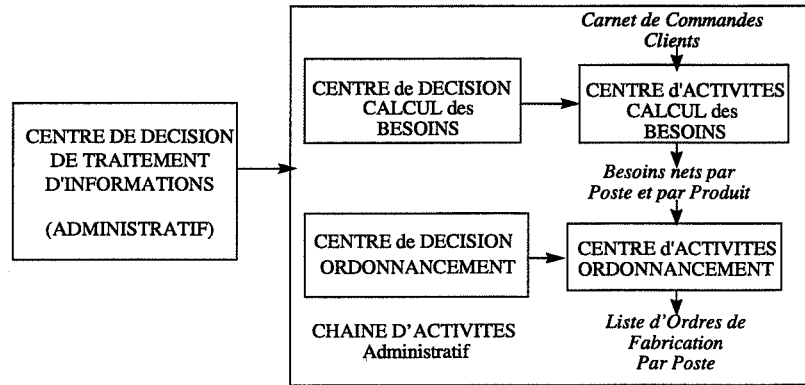


Figure VII. 3 : Modélisation du processus administratif de l'entreprise E

### 3.3 Processus opérationnel de transformation physique

Le processus de transformation physique des matières premières en produits finis (fig. VII. 4) est également représenté par une chaîne d'activités physiques et un centre de décision. Chaque centre d'activités regroupe les opérations élémentaires (préparation, assemblage, et traitement de surface), et est dirigé par un centre de décision qui pilote les opérations de transformation. La chaîne d'activité maintenance est mise en place pour répondre à l'objectif de l'entreprise E en terme de diminution des arrêts machines. Cette chaîne est, elle aussi constituée d'un centre de décision maintenance pilotant un centre d'activité.

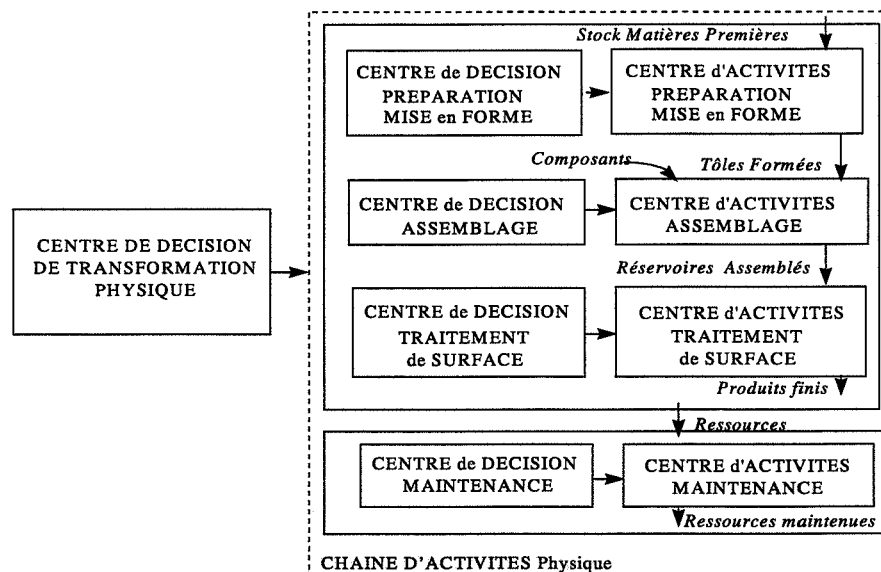


Figure VII. 4 : Modélisation du processus physique de l'entreprise E

Pour représenter, analyser et étudier complètement les changements intervenus sur les différents processus et chaînes d'activités, ainsi que les comportements dynamiques au sein de l'organisation, nous devons donc détailler le comportement cognitif de chaque centre de décision et le fonctionnement de chaque centre d'activités.

En effet, comme l'indique J. L. Le Moigne [Le Moigne, 90], « modéliser, c'est à la fois identifier et formuler quelques problèmes, en construisant des énoncés, et chercher à résoudre ces problèmes en raisonnant par des simulations. En faisant fonctionner le modèle énoncé, on tente de produire des modèles solutions. Modélisation et simulation, réflexion et raisonnement, sont les deux faces inséparables de toute délibération ».

Nous reprenons, ainsi la représentation de l'entreprise E depuis les processus stratégiques jusqu'aux chaînes d'activités, en spécifiant pour chacun des niveaux les agents cognitifs concernés.

## 4 LE MODELE D'ENTREPRISE A BASE D'AGENTS

### 4.1 Architecture des agents

A travers ce modèle (fig. VII. 5), nous allons décrire, d'une manière plus fine, les concepts cognitifs des centres de décisions de l'entreprise, depuis le niveau stratégique jusqu'aux chaînes d'activités.

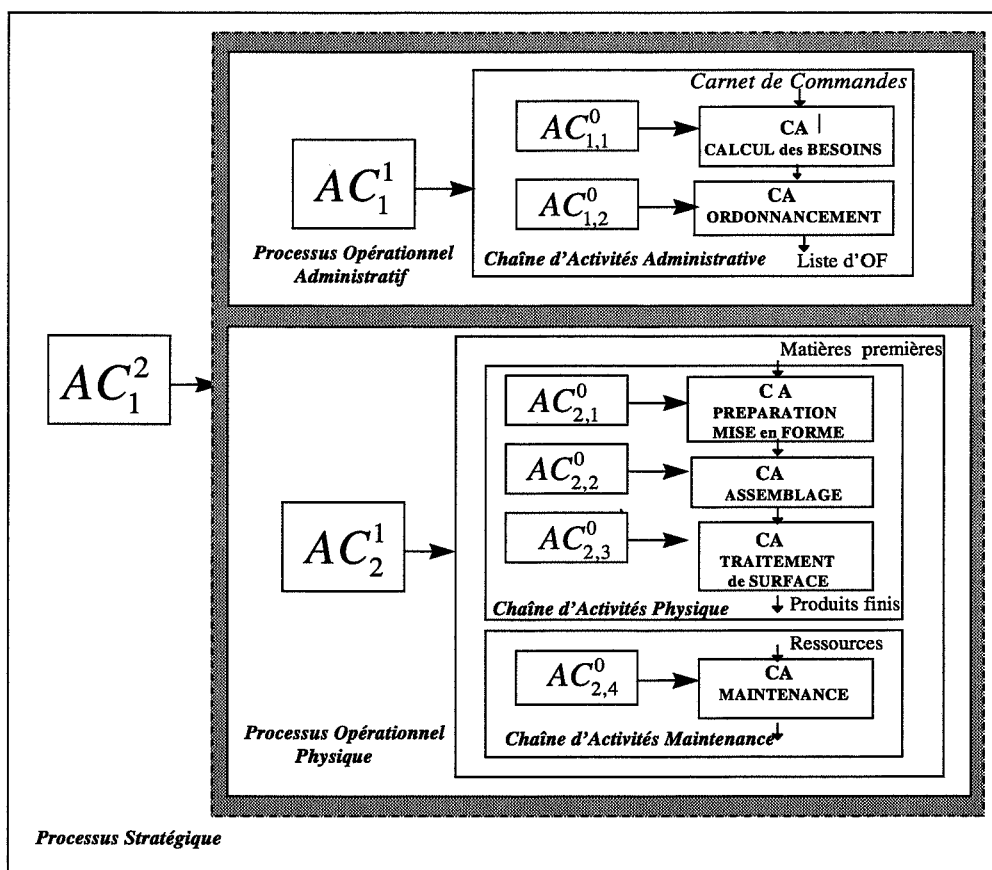


Figure VII. 5 : Entreprise E. : Modèle à simuler

Ce qui va nous permettre d'étudier les mécanismes et les phénomènes d'orientation de prise de décisions et d'apprentissage, et ainsi le comportement dynamique de l'organisation. Bien entendu, les concepts cognitifs présentés ne sont pas exhaustifs.

#### 4.1.1 Processus stratégique

Au niveau stratégique (ou projet ), nous retrouvons l'agent stratégique  $AC_1^2$  qui est habilité à prendre des directives pour restructurer les processus opérationnels de traitement d'informations et de transformation physique (fig. VII. 5).

Nous allons maintenant décrire, d'une manière détaillée, l'ensemble de la connaissance de l'agent à savoir les connaissances du domaine, les connaissances de contrôle (intention, rationalités, décision, croyances, etc..), et enfin les connaissances de communication (accointances, etc..)(cf. chap. IV.). Cet espace de connaissances permet de générer les engagements qu'il émet en direction des processus opérationnels qu'il transforme.

### Agent Stratégique $AC_1^2$

Intention AC strat // Les intentions possibles de l'agent stratégique  
 -I1: pereniser\_clientele  
 -I2: augment\_chiff\_affaire  
 -I3: augmenter\_rentabilite  
 .....  
Accointances AC strat // liste des agents avec qui, l'agent stratégique est en relation directe

$AC_1^1$   $AC_2^1$

// Les rationalités structurelles et évaluatives (propres) de l'agent stratégique

<u>Rs AC strat prop</u>	<u>Re AC strat prop</u>
-Rsp1: nPh, Ad	- Rep1 : Taux_Serv_Client(x)
-Rsp2: Ph, nAd	-...
-Rsp3: Ph, Ad	// Action possible sur les deux processus, Physique et Administratif

Croyances AC strat // Les croyances (ex. état du marché) de l'agent stratégique  
 -C1: Conc\_Respecte\_delais(Val)  
 -C2: Conc\_Baisse\_prix(Val)  
 -C3: Conc\_Reducit\_delai(Val)  
 -C4: Etre\_Reactif  
 -C5: Optimiser\_ressources  
 .....

Comp AC domaine (objets du domaine) // Les connaissances de l'agent permettant de générer les directives qu'il émet en direction des processus qu'il pilote  
 - CpC1 : Respecter\_delai(ValRef)  
 - CpC2 : Productivite(val)  
 - CpC3 : .....  
 - CpM1 : Methode\_gest\_adm\_stock  
 - CpM2 : Optimisation\_Ressources  
 - CpM3 : .....

**Compétences Opératoires de Conception (expertise du domaine)**

- |                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| - CpOc1 : Si I1 & C1(Val) > 70% | Alors CpC1(Val = C1(Val)+ x%) |
| - CpOc2 : Si Rsp1 & CpC1(80%)   | Alors CpM1                    |
| - CpOc3 : Si Rsp1 & CpC1(80%)   | Alors CpM2                    |
| .....                           |                               |

**Compétences Opératoires de Raisonnement (expertise du domaine)**

- |                                     |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| - CpOr1 : Si Rep1(Val) > 90% & CpM1 | Alors CpM1                 |
| - CpOr2 : Si Rep1(Val) < 90% & CpM2 | Alors CpM2                 |
| - CpOr3 : Si CpM1 & AC1             | Alors P1                   |
| - CpOr4 : Si CpM2 & AC1             | Alors P1                   |
| - CpOr5 : Si CpM1 & P1              | Alors Rs2 & Re1(90%) & D2  |
| - CpOr6 : Si CpM2 & P1              | Alors Rs1 & Re1(<90%) & D1 |
| .....                               |                            |

Nous présentons l'ensemble des directives possible ( émises vers l'agent cognitif  $AC_1^1$  pilotant la chaîne d'activités de traitement d'informations, et vers l'agent  $AC_2^1$  pilotant la chaîne d'activités de transformation de matières premières en produits finis,), mais dans un contexte donné (scénario) seule l'une d'entre elle sera émise en fonction des connaissances décrites précédemment (il en sera de même quelque soit le niveau).

// directives vers  $AC_1^1$

**Rs AC strat vers adminis**

- Rs1: pas\_augmentation\_stock
- Rs2: poss\_augmentation\_stock
- Rs3: poss\_modif\_proc\_adminis
- .....

**Re AC strat vers adminis**

- Re1: taux\_service\_Cli(x)
- Re2: 0\_retard\_client
- Re3: satisfaction\_client
- .....

**Decision AC strat vers adminis**

- D1:GPAO()
- D2: methode-gestion\_stock
- D3: application\_MRP()
- D4: suppression\_agent(X)

// directives vers  $AC_2^1$

**Rs AC strat vers phys**

- Rs4: pas\_augment\_ressources
- Rs5: poss\_augmentation\_ress
- .....

**Re AC strat vers phys:**

- Re4: 0\_retard\_client
- Re5: productivité....

**Decision AC strat vers phys**

- D5: application\_flux\_pousse()
- D6: mainten\_Inv\_Red\_Panne
- D7: mainten\_Inv\_Cap\_setup
- D8: mainten\_Inv\_Cap\_ress
- D9: application\_flux\_tire

#### 4.1.2 Processus opérationnel de traitement d'information

Nous allons présenter successivement l'agent cognitif  $AC_1^1$  qui pilote la chaîne d'activités de traitement d'informations, puis le détail de cette chaîne, c'est-à-dire l'agent cognitif de calcul des besoins  $AC_{1,1}^0$  et le centre d'activités qu'il pilote  $CA_{1,1}^0$  ainsi que l'agent cognitif d'ordonnancement  $AC_{1,2}^0$  et le centre d'activités qu'il pilote  $CA_{1,2}^0$ .

Pour piloter la chaîne d'activités administrative, l'agent  $AC_1^1$  possède des intentions, des directives du niveau supérieur, des croyances, des compétences, etc., que nous regroupons dans le tableau ci-dessous :

### Agent Administratif $AC_1^1$

<b><u>Inten AC interm adminis</u></b> // L'intention de l'agent administratif qui est, en générale, respecter (satisfaire) la rationalité évaluative reçue.		
-I1: respect_Re		
-I2: non_respect_Re		
-I3: faire_zele		
.....		
<b><u>Acc AC interm adminis</u></b> // Liste des accointances de l'agent administratif		
$AC_{1,1}^0$ $AC_{1,2}^0$		
$AC_2^1$ $AC^2$		
// Les directives (Re, Rs, D) reçues depuis le niveau supérieur		
<b><u>Re AC interm adminis</u></b>	<b><u>Rs AC interm adminis</u></b>	<b><u>Dec AC interm adminis</u></b>
-Rep1: taux_service_Cli(x)	-Rsp1: pas_augment_stock	-Dp1:GPAO()
-Rep2: 0_retard_client	-Rsp2: poss_augment_stock	-Dp2: methode-gestion_stock
-Rep3: satisfaction_client	-Rsp3: poss_modif_proc_adminis	-Dp3: application_MRP()
.....	.....	-Dp4: suppression_agent(X)
		.....
<b><u>Croy AC interm adminis</u></b> // Les coyances de l'agent administratif		
-C1: bon_client(x)		
-C2: stock_sec_majore		
-C3: produit_critique(y)		
-C4: tmp_chgt_outil_faible		
-C5: ordre_passage_f(opérateurs)		
-C6: rupture_appro		
-C7: machine_goulot(m)		
.....		
<b><u>Comp AC interm domaine</u></b> // Les compétences qui permettent à l'agent de prendre des directives et d'orienter les décisions des agents du niveau inférieur		
- CpC1 : installer_ordo	- CpM1: choisir_ordo(m)	
- CpC2 : déterminer_appro	- CpM2 : optimiser_stock_secu	
- CpC3 : .....	-CpM3 : calculer_besoin	
<b>Compétences Opératoires de Conception</b>		
- CpOc1 : Si I1 & Rep1 & Dp1 & C5	Alors CpC1	
- CpOc2 : Si I1 & Rep1 & Dp2 & C2	Alors CpM3	
- CpOc3 : Si I1 & Rep1 & Dp1 & C6	Alors CpC2	
- CpOc4 : Si I1 & Rep1 & Dp2 & C7	Alors CpM5	
- CpOc5 : Si CpC1 & Rsp1	Alors CpM2	
- CpOc6 : Si CpC2 & Rsp1	Alors CpM4	
<b>Compétences Opératoires de Raisonnement</b>		
- CpOr1 : .....		

Les directives possibles émises vers le niveau inférieur (les agents  $AC_{1,1}^0$  et  $AC_{1,2}^0$ ) sont :

<b><u>Re AC interm vers</u></b> $AC_{1,1}^0$	<b><u>Rs AC interm vers</u></b> $AC_{1,1}^0$	<b><u>Dec AC interm vers</u></b> $AC_{1,1}^0$
-Re1: stock_moyen_min	-Rs1: pas_toucher_secuStocks	-D1: methode_calcul_besoins
-Re2: 0_retard_client	-Rs2: poss_augmentation_stock	-D3: choix_methode_approvis
-Re3: minimise_stock_MP	-Rs3: AC_operat1_approvis	.....
....	....	
<b><u>Re AC interm vers</u></b> $AC_{1,2}^0$	<b><u>Rs AC interm vers</u></b> $AC_{1,2}^0$	<b><u>Dec AC interm vers</u></b> $AC_{1,2}^0$
-Re4: satisfaction_client	-Rs4: definir_tailles_lots	-D2: methode_ordo_mx
-Re5: limit_nbre_changem_outils	....	.....
-Re6: satisfaction_client		
.....		

La chaîne d'activités de traitement d'informations est constituée de  $AC_{1,1}^0$  pilotant le centre d'activité calcul des besoins  $CA_{1,1}^0$ , et de  $AC_{1,2}^0$  pilotant le centre d'activité d'ordonnancement  $CA_{1,2}^0$ .

⇒ Agent calcul des besoins  $AC_{1,1}^0$

L'agent calcul des besoins  $AC_{1,1}^0$  va transmettre une directive, qui se résume à une décision, au centre d'activité  $CA_{1,1}^0$  de type : « stock de sécurité (par type de pièce) en aval de chaque poste. A son tour,  $CA_{1,1}^0$  va déterminer la quantité de produit à fabriquer  $x$  « $P_{x,i}$ » pour chaque poste  $i$  (c'est-à-dire les besoins nets), en tenant compte du carnet de commandes qui décrit les commandes des clients en produits finis.

Si l'on a, par exemple à fabriquer deux produits A et B sur 3 postes de travail, l'algorithme de fonctionnement de  $CA_{1,1}^0$  pour calculer les quantités à produire aux postes 1, 2, et 3 du produit  $x = A$  ou  $B$  est le suivant :

Algorithme du calcul des besoins

```
{ ..
int Bx = CarnetDC.TotalX(); // Total des commandes de produit x (A ou B)
int Qsx,i = Decision.SecuStocks; // Valeur du stock de sécurité prod. A ou B par poste (i= 1 à 3)
int Ecx,i = EnCX[i]; // En cours de fabrication du produit A ou B par poste i
int Qx,i = StockAmont; // Quantité en stock de produit A ou B par poste i

Px,3 = Bx - Qx,3 - Ecx,3 + Qsx,3 // Quantité à produire au poste 3, avec x = A ou B ;
Px,2 = Px,3 - Qx,2 - Ecx,2 + Qsx,2 // Quantité à produire au poste 2, avec x = A ou B ;
Px,1 = Px,2 - Qx,1 - Ecx,1 + Qsx,1 // Quantité à produire au poste 1, avec x = A ou B ;
}
```

Pour calculer  $P_{x,3}$ ,  $P_{x,2}$ ,  $P_{x,1}$ , le centre d'activité a besoin de :

$Qs_{A,i}$ ,  $Qs_{B,i}$  qui ne sont autres que les décisions transmises par l'agent  $AC_{1,1}^0$ , par le biais de sa fonction DeposerMessage (ClasseMessage), dans la boîte aux lettres du centre d'activité. Ces décisions, comme nous venons de le signaler, sont les valeurs des stocks de sécurité (par type de produit A et B) en aval de chaque poste  $i$ .

$E_{A,i}$  = EnCA[i], et  $E_{B,i}$  = EnCB[i] sont les en cours de fabrication des produits A et B par poste  $i$ .

$Q_{A,i}$  = StockAmt.numberIn();  $Q_{B,i}$  = StockAmt.numberIn() sont les quantités en stock de produit A ou B par poste  $i$ .

Les en cours  $E_{x,i}$  et les quantités de produit en stock  $Q_{x,i}$  sont les résultats de la simulation.



Une fois achevée l'opération calcul des besoins, l'agent  $AC_{1,1}^0$  va transmettre à l'agent ordonnancement  $AC_{1,2}^0$  les besoins nets, c'est à dire les quantités de pièces ( $P_{x,i}$ ) de type A et B à fabriquer sur chacun des postes de production pendant la semaine.

⇒ Agent ordonnancement  $AC_{1,2}^0$

L'agent ordonnancement va assurer le réglage du centre d'activité ordonnancement, en lui transmettant une décision de type « méthode x d'ordonnancement » ou directement « taille de lot pour la fabrication des pièces de type A et des pièces de type B, sur chacun des trois postes :  $T_{x,i}$  ». Le centre d'activité  $CA_{1,2}^0$  va alors déterminer une liste d'Ordre de Fabrication (O.F.) pour chacun des trois postes de production, en tenant compte du flux sortant du centre calcul des besoins.

Pour réaliser le réglage de ce centre et ordonnancer la production, l'agent ordonnancement possède des compétences (règles, ...).

*Exemples : - Si les tailles de lots sont diminuées, alors le processus de fabrication devient plus réactif,  
- Si le processus de fabrication devient plus réactif, alors le taux de service s'améliore.*

Les centres d'activités ont été implémentés sous forme de classes d'objets :

```

Class CA_calculBesoins
{
protected :
    strings _identificateur ;    // CA
    strings _processus ;        // Proc-Adm
    ClasseAgent *pAgent
    ListeMessage _boiteAuxLettres ;

public :
    void Calcul_Besoins () ;
}
    
```

```

Class CA_Ordo
{
protected :
    strings _identificateur ;    // CA
    strings _processus ;        // Proc-Adm
    ClasseAgent *pAgent // Agent
    ListeMessage _boiteAuxLettres ;

public :
    void Ordonnancement () ;
    void DepotMessage (ListeMessage) ;
}
    
```

Nous rappelons pour mémoire, que le flux principal de sortie de tout le processus administratif est constitué d'une liste d'O.F, définis par une quantité et un type de produit pour les trois postes. Ce flux va être récupéré par les agents du niveau opérationnel du processus physique, que nous allons décrire.

#### 4.1.3 Processus opérationnel de transformation physique

Comme nous l'avons fait pour le processus opérationnel de traitement d'informations, nous allons présenter successivement l'agent cognitif  $AC_2^1$  qui pilote la chaîne d'activités de transformation de matières premières en produits finis, puis le détail de cette chaîne, c'est-à-dire les agents cognitifs de pilotage du flux physique  $AC_{2,i}^0$  et les centres d'activités associées  $CA_{2,i}^0$ .

L'agent  $AC_2^1$  a des compétences, des directives reçues depuis le niveau supérieur pour orienter ses directives pour le niveau inférieur, des intentions, des croyances, etc..

### Agent Physique $AC_2^1$

Action vers  $AC_{2,1}^0$   $AC_{2,2}^0$   $AC_{2,3}^0$  (Opérateurs)  $AC_{2,4}^0$  (agent maintenance)

<p><u>Inten AC interm phys</u> // Intention de l'agent</p> <p>-I1: respect_Re</p> <p>-I2: non_respect_Re</p> <p>-I3: faire_zele</p> <p>.....</p> <p>// Les directives reçues depuis le niveau supérieur</p>		
<p><u>Rs AC interm phys</u></p> <p>-Rsp1: pas_augment_ressources</p> <p>-Rsp2: possib_augmentation_ress</p>	<p><u>Re AC interm phys</u></p> <p>-Rep1: 0_retard_client</p> <p>-Rep2: productivité</p>	<p><u>Dec AC interm phys</u></p> <p>-Dp5: application_flux_pousse()</p> <p>-Dp6: mainten_Inv_Red_Panne</p> <p>-Dp7: mainten_Inv_Cap_setup</p> <p>-Dp8: mainten_Inv_Cap_ress</p> <p>-Dp9: application_flux_tire</p>
<p><u>Acc AC interm phys</u> // Les accointances de l'agent <math>AC_2^1</math></p> <p><math>AC_1^1</math> <math>AC_2^2</math></p> <p><math>AC_{2,1}^0</math> <math>AC_{2,2}^0</math></p> <p><math>AC_{2,3}^0</math> <math>AC_{2,4}^0</math></p> <p>// Les directives (Rs+Re+D) émises vers le niveau inférieur (les opérateurs et l'agent maintenance)</p>		
<p><u>Rs AC interm vers operat</u></p> <p>Rs1: respect_liste_OF;</p> <p>Rs2: poss_modif_liste_OF</p> <p>Rs3: poss_utilis_mach_identique</p> <p>Rs4: choix_quant_et_typ_pieces</p> <p>.....</p>	<p><u>Re AC interm vers operat</u></p> <p>Re1: taux_rendement</p> <p>Re2: satisfaction_client</p> <p>Re3: productivité</p> <p>Re4: suivi_planing_KANBAN</p> <p>.....</p>	<p><u>Dec AC interm vers operat</u></p> <p>-D1: validation_liste_OF</p> <p>-D2: nbre_KANBAN &amp; seuil_declench_par_reference</p> <p>.....</p>
<p><u>Rs AC interm vers maint</u></p> <p>Rs5: respect_plan_maint_previs</p> <p>Rs6: adapter_planing</p> <p>Rs7: choix_ressources_invest</p> <p>.....</p>	<p><u>Re AC interm vers maint</u></p> <p>Re5: maintien_ressources</p> <p>Re6: taux_panne_mach_goulot</p> <p>Re7: productivite</p> <p>.....</p>	<p><u>Dec AC interm vers maint</u></p> <p>-D3: liste_interventions</p> <p>-D4: methode_maintenance_x</p> <p>-D5: investissement_machines</p> <p>.....</p>

Les centres d'activités de transformation de la matière ont une capacité journalière de huit heures et fonctionnent cinq jours par semaine. Chaque centre d'activités produit ses pièces par lots, selon une taille donnée par l'agent cognitif qui le pilote, et ne transmet les pièces qu'il a fabriquées sur l'aire de stockage en aval qu'une fois le lot complet.

#### ⇒ Agents cognitifs $AC_{2,i}^0$

Les agents  $AC_{2,i}^0$  ont, généralement, une intention de respecter leur rationalités évaluatives, des croyances sur les données de production et l'état des machines, des directives du niveau supérieur (de l'agent  $AC_2^1$ ). Avec ces connaissances, les agents prennent des décisions qui sont dans tous les cas : quantités et types de pièces à produire sur les postes de travail. La décision prise par l'agent maintenance est la date plus la durée d'arrêt des postes de travail.

## 4.2 Scénarios productiques

Nous avons étudié le comportement des agents en terme de prise de décision (déclinaison de directives) et d'apprentissage dans le cadre de scénarios productiques. Huit scénarios (cf. annexe A) stratégiques d'amélioration de la flexibilité (autonomie au niveau du processus administratif, autonomie au niveau physique, autonomie à tous les niveaux, passage d'une méthode de gestion à une autre, système kanban de pilotage de la production, méthode SMED de changement rapide d'outils, etc..) ont été envisagés, pour montrer que le modèle d'organisation productive à base d'agents est assez flexible et ouvert pour supporter les changements organisationnels.

Bien entendu, cette classification nous permet de séparer de façon disjointe chaque stratégie pour essayer de comprendre les implications de chacune d'elles. Dans la réalité les divers scénarios peuvent coexister d'où d'ailleurs l'apparition parfois de dysfonctionnement (cf. annexe A).

## 5 EXEMPLE

### Scénario : GPAO Ordonnancement (Autonomie Administrative)

Pour illustrer un cas d'apprentissage<sup>111</sup>, nous nous sommes focalisés sur un scénario où l'autonomie administrative est au niveau de l'agent  $AC_{1,2}^0$  (ordonnancement). Ce scénario (simple mais parlant) est assez représentatif des PME de sous-traitances dans lesquelles le calcul des besoins est généralement succinct compte tenu de nomenclature simple, par contre l'accent est souvent mis sur l'ordonnancement dans la mesure où les temps de changements d'outils peuvent être importants.

### 5.1 Architecture décisionnelle

Ce scénario correspond à une organisation dans laquelle les directives sont déclinées d'un niveau à l'autre de manière hiérarchique (fig. VII. 6). Il n'y a pas de latitudes décisionnelles au niveau du processus physique, et les agents ( $AC_2^1$ ,  $AC_{2,i}^0$ ) qui pilotent le flux physique respectent parfaitement les listes d'OF qu'ils reçoivent. Tandis que les acteurs décisionnels du niveau administratif le plus bas, et plus précisément l'agent ordonnancement  $AC_{1,2}^0$  (classiquement agent de planning) a une certaine autonomie de fonctionnement et gère son centre d'activité avec plus de degrés de liberté. Nous allons présenter son comportement pour concevoir des listes d'ordres de fabrication en fonction de ses rationalités (du niveau supérieur) et de ses compétences (§. 5.3).

Par rapport à la figure suivante,  $AC_{j,k}^i$  est l'agent cognitif avec :

i : niveau de modélisation,

<sup>111</sup> L'apprentissage au niveau stratégique est vu comme le passage d'un mode de gestion à un autre.

j : numéro du processus (administratif=1, physique=2),  
k : numéro attribué à l'agent du niveau chaînes d'activités.

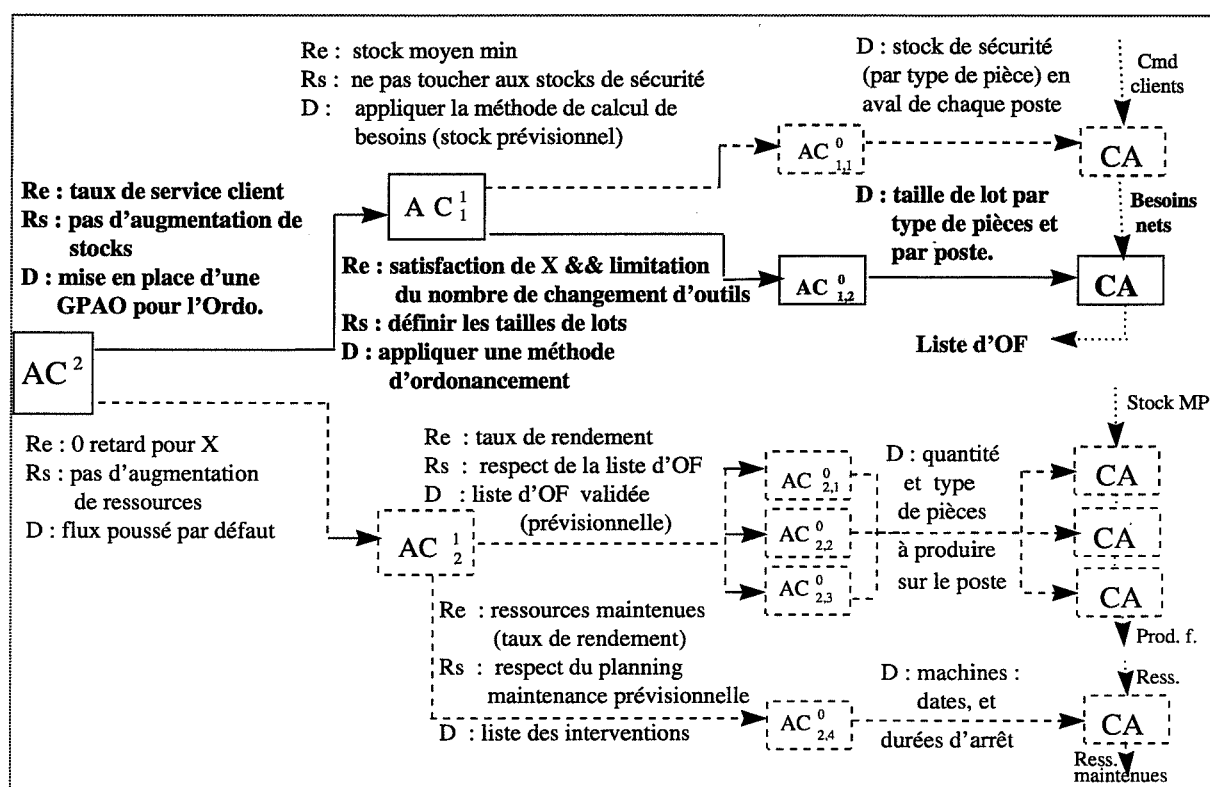


Figure VII. 6 : Scénario de déclinaison de directives

## 5.2 Données de production

Ces données vont nous permettre de préciser les paramètres de simulation.

- ① Le Plan Industriel et Commercial (P.I.C) : 3 clients, 2 commandes par clients, 320 pièces par semaine.
- ② La durée de travail est de 40 heures (35 heures en perspective) sans heures supplémentaires.
- ③ Durées opératoires : les durées par machine et par produit en centième d'heure (ch).

Machines	Machine 1	Machine 2	Machine 3
Produit A	8 ch	13 ch	8 ch
Produit B	13 ch	8 ch	8 ch

- ④ Temps de changement d'outils : 100 ch.

- ⑤ Pannes : en moyenne 2,5 par semaine (MTBF=48), chaque panne dure en moyenne 1h de

temps.

- ⑥ Rebut : dans ce scénario, on ne tient compte que des pannes (pas de rebuts).
- ⑦ Maintenance : 2 h par semaine à situer par le biais d'une gamme prioritaire (rappel maintenance préventive est égal à la suppression totale des pannes).

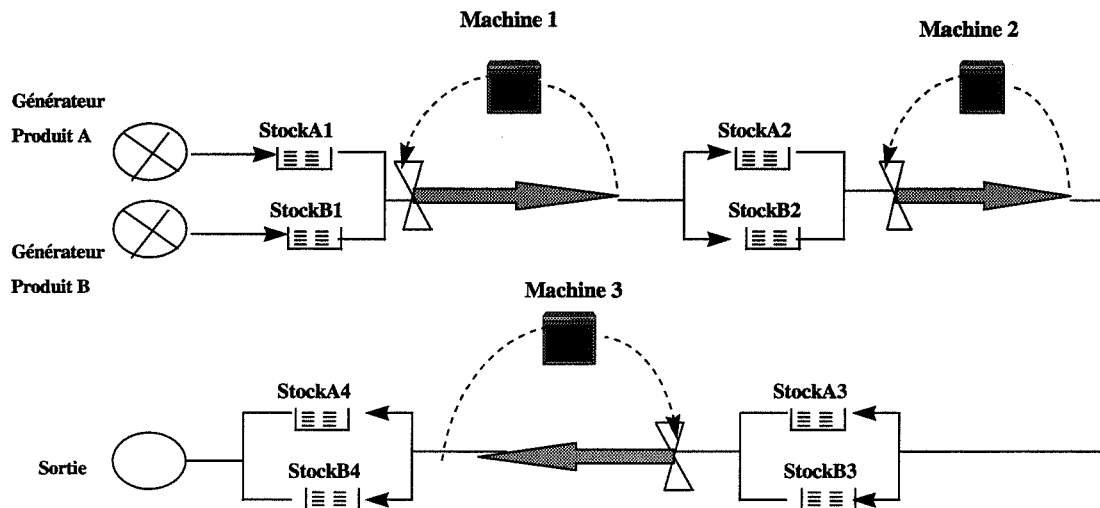


Figure VII. 7 : Exemple d'atelier de production

Nous avons décidé de réaliser les campagnes de simulation sur une durée de 10 semaines.

Un certain nombre d'indicateurs sont enregistrés après chaque simulation, dans des fichiers qui peuvent être importés et exploités sous Excel. Ceux-ci concernent la comptabilité (ex. trésorerie, achats, ventes, frais fixes, frais variables, amortissement, etc.), l'activité des cellules (ex. taux de temps passé en Setup/ Préparation, taux de temps passé en réparation de panne, etc.), les produits et les fabrications (ex. quantités terminées, quantités vendues, quantités en cours de fabrication, durée moyenne de cycle, etc.).

- ⑧ Deux contextes, correspondant aux commandes des clients en produit A et en produit B, ont été retenus :

- Contexte 1 :

	Client 1	Client 2	Client 3
Produit A	80	40	40
Produit B	40	40	80

- Contexte 2 :

	Client 1	Client 2	Client 3
Produit A	80	50	30
Produit B	50	50	60

### 5.3 Démarche et résultats

L'agent  $AC_1^1$  qui pilote la chaîne d'activités de traitement d'informations a pour objectif (rationalité fixée par le niveau supérieur) *d'améliorer le taux de service client*. Cet objectif va être décliné (fig. VII. 6) pour l'agent ordonnancement  $AC_{1,2}^0$  en « satisfaction du client 1 » et en « nombre de changements d'outils ».

Pour l'étude du comportement de l'agent de planning (ordonnancement), nous allons observer 2 indicateurs (correspondant à ses rationalités évaluatives) :

- Indicateur 1 : la satisfaction du client 1 qui sera calculée à partir du retard moyen de livraison ;
- Indicateur 2 : le nombre de changements d'outils ;

Les performances de l'agent ordonnancement, et ainsi de l'organisation, vont être analysées selon deux sous scénarios qui correspondent à deux méthodes (décisions) que peut appliquer l'agent ordonnancement, du moment qu'il a une totale autonomie de prise de décision et de choix de méthodes, si l'on prend en compte les décisions et les rationalités du niveau supérieur (cf. fig. VII. 6).

#### Phase 1 : Construction de la base de cas

Nous partons du principe que notre agent n'a pas vraiment d'expérience, il a des méthodes (compétences) qu'il applique sans être sûr des résultats. Il va commencer à construire sa base de cas (fig. VII. 8), en se basant sur le contexte 1 (cf. point 8 § 5.2) et en utilisant ses compétences.

Sous scénario 1 : il applique la méthode 1 qui correspond à :

« Pour des raisons de traçabilité, faire des lots par commande, en alternant A et B ».

Sous scénario 2 : la méthode 2

« Faire des petits lots, en prenant comme taille de lot le PGCD des tailles des commandes ; alterner le produit A et B »

#### Phase 2 : Exploitation de la base de cas

Une fois la base de cas constituée, l'agent de planning constate<sup>112</sup> que la méthode 1 :

- satisfait parfaitement le client 1 sur les deux produits commandés A et B, ainsi il a bien respecté sa rationalité évaluative ;
- satisfait moyennement les clients 2 et 3 ;
- que le nombre de changement d'outils est aussi moyen ;

---

<sup>112</sup> Pour nous ces constats sont les résultats détaillés, retournés par le simulateur SIM'2.

L'application de la deuxième méthode (avec le PGCD = 40), s'avère plus intéressante du fait que l'agent :

- satisfait son client 1 et le client 2 sur les deux produits A et B ;
- le client 3 demeure moyennement satisfait ;
- le nombre de changement d'outils est le même ;

L'agent se trouve maintenant dans un autre contexte (contexte 2), il va donc exploiter sa base de cas pour trouver une solution. Il trouve deux cas correspondant aux deux méthodes 1 et 2, avec les mêmes descripteurs discriminants (intention, rationalités, décision) et un contexte légèrement différent (même nombre de clients, total des commandes identique, distribution des produits finis aux clients différente). Il va bien entendu choisir la deuxième solution (2<sup>ème</sup> méthode qui correspond au PGCD des commandes) qui a donné de meilleurs résultats. Il l'adapte par rapport au nouveau contexte (contexte 2), le PGCD sera égal à 10. Les résultats sont alors moins bons, l'adaptation a échoué :

- le client 1 satisfait ;
- les clients 2 et 3 sont livrés à peu près à 3-4 semaines de retard sur chacun des produits A et B ;
- le nombre de changement d'outils est constant ;

L'agent va alors appliquer la méthode 1 (qui je rappelle a donné des résultats pas très satisfaisants dans le contexte 1). Les résultats de l'application de cette méthode pour ce contexte sont plutôt meilleurs :

- le client 1 très satisfait (retard moyen = 0%);
- les clients 2 et 3 sont livrés avec des retards moyens sur les produits A et B ;
- le nombre de changement d'outils est aussi moyen ;

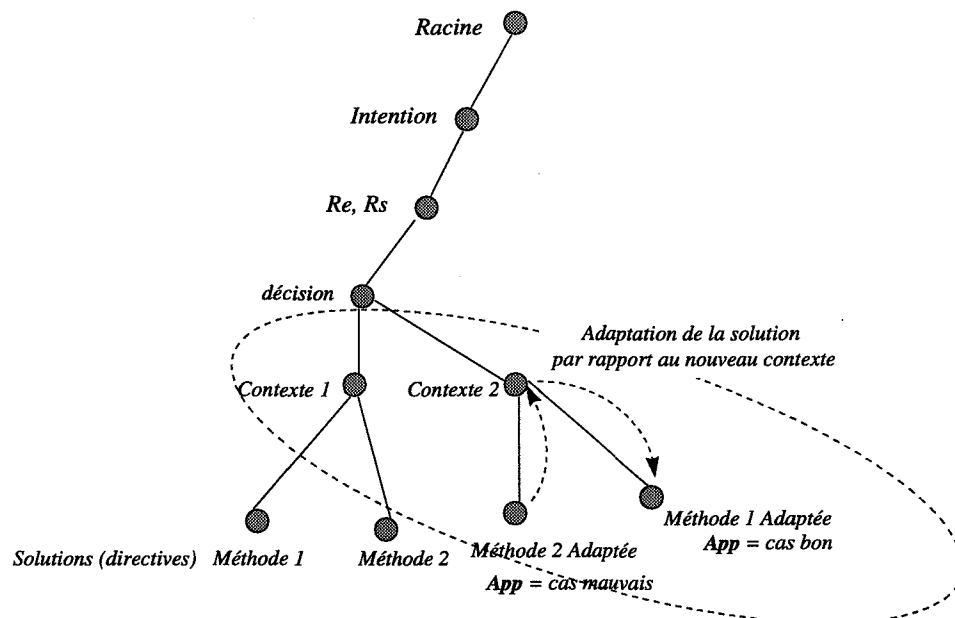


Figure VII. 8 : Arbre de cas de l'agent ordonnancement

L'agent constate que parmi toutes les solutions appliquées aucune n'améliore le nombre de changements d'outils, il va donc raisonner sur ses compétences, et ainsi enrichir sa base d'expérience. Il sait que s'il n'alterne pas les produits A et B, il y aura moins de changements d'outils. Effectivement en appliquant la méthode 1 sans alternance des produits, il a réussi à avoir un nombre de changements d'outils plus faible mais en ne satisfaisant le client 1 que sur le produit A et une satisfaction médiocre pour les autres clients.

Cette étude montre que l'influence des changements d'outils est importante, par conséquent l'information doit remonter au niveau stratégique pour que l'agent de ce niveau décide de la mise en place d'une autre méthode de gestion qui joue sur le changement rapide d'outils, la méthode SMED.

## 6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons essayé de montrer que les modèles que nous avons proposés, et l'intégration des concepts d'intelligence artificielle distribuée, étaient adaptés pour représenter le cas réel du projet d'une entreprise industrielle confrontée à l'évolution de son environnement, et répondant selon une démarche d'intégration et de flexibilité par une reconfiguration de ses processus principaux et par une distribution de la décision et d'autonomie des acteurs décisionnels. En effet, la représentation d'une plus grande autonomie des acteurs décisionnels, et de la possibilité pour eux d'agir avec une certaine latitude décisionnelle a permis d'étudier les évolutions en terme de performance de l'organisation.

L'utilisation de la simulation nous a permis de mettre en scène des phénomènes constatés au sein des organisations productives tels que la dynamique des comportements des acteurs décisionnels en terme de déclinaison de directives (rationalités évaluatives, rationalités structurelles, et décisions) et surtout d'apprentissage à partir de cas (expérience).

Pour montrer la faisabilité et l'adaptation de MAC2 du point de vue de l'autonomie de prise de décision et d'apprentissage par cas, nous avons choisi, pour un premier temps, un exemple d'agent (apprenant) du niveau le plus bas de l'organisation, vu que l'apprentissage et l'adaptation se font sur des règles de fonctionnement assez simples. En perspective, nous l'appliquerons à des agents du niveau stratégique qui raisonnent et appliquent des heuristiques plus complexes.





## CONCLUSION GENERALE





## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### 1 Rappel des objectifs du travail de recherche

La réactivité des organisations productives est devenue un impératif industriel majeur dans un contexte économique de forte incertitude. L'amélioration de cette réactivité, qui repose sur l'intégration et la flexibilité face aux perturbations de toute nature, passe par diverses voies, entre autres : - une redistribution de la décision aux différents niveaux de l'organisation (décentralisation du système décisionnel et son rapprochement du système physique) ; - un accroissement d'autonomie de ses acteurs décisionnels.

En effet, l'incertitude qui affecte l'environnement externe ou interne de l'entreprise et l'irruption de la variété obligent à voir la structure de décision, non comme une structure centralisée, mais comme une structure distribuée entre plusieurs centres. Pour gérer le variable de l'incertain, chaque centre doit disposer d'une autonomie et liberté de choix pour prendre ses décisions.

L'objectif de ce travail de recherche est de proposer un modèle de compréhension des mécanismes décisionnels dans l'entreprise incluant les actes et les interrelations. Il faut donc modéliser cette entreprise en mettant l'accent sur les processus décisionnels et les phénomènes d'orientation des décisions, et l'enrichissement des compétences des acteurs permettant une prise de décision cohérente. Nous avons considéré que la performance d'une entreprise dépend désormais de son aptitude à acquérir et à accumuler rapidement des savoirs. En effet la réactivité de l'organisation est liée à la qualité des compétences économiques et techniques localisées.

### 2 Travail effectué par rapport aux objectifs fixés

Nous avons entamé le processus de modélisation des organisations productives par le modèle Méta2 (chapitre I) qui s'appuie sur le paradigme méta-systémique. Ce modèle permet de décrire efficacement les organisations productives, en se basant sur une représentation distribuée des processus de décisions, et une formalisation des phénomènes d'orientation des comportements des acteurs décisionnels. En effet, l'intégration de concepts métasystémiques a permis de modéliser les rationalités, les intentions, et les motivations des centres de décisions.

Nous avons développé les caractéristiques spécifiques des mécanismes internes de la prise de décision (le schéma « intelligence-modélisation-choix-retroaction) en faisant appel aux travaux de psychologues et de spécialistes des comportements (behaviorists) en particulier de H. A. Simon.

L'approche multi-agents semble apporter une voie nouvelle intéressante pour la modélisation des organisations productives. Elle a permis de formaliser à la fois l'organisation et les entités autonomes qui la composent. Par l'importance qu'elle accorde à l'autonomie des entités

constituantes, elle a permis d'apporter des abstractions intéressantes et utiles pour la description, l'analyse et la conception de comportements de systèmes complexes telle une société humaine. Dans ce contexte, chaque agent a un point de vue différent et participe à la définition des objectifs et aux performances globales de l'entreprise

En s'appuyant sur ces concepts, nous avons construit, dans la chapitre IV, un Modèle d'Agents Cognitifs : MAC1, qui formalise les différents composants d'une organisation productive et décrit clairement les entités décisionnelles dans l'organisation, leurs connaissances, leurs croyances, leurs engagements, leurs interactions, leurs coopérations, etc.. Ainsi, l'intégration des concepts liés aux systèmes multi-agents au modèle d'organisation productive Méta2, a permis d'étudier et de comprendre les phénomènes d'orientation de la décision.

L'apprentissage est indispensable, il est une condition nécessaire de l'autonomie. L'exécution chez l'homme d'une tâche quelle qu'elle soit, et surtout la prise de décision, est inséparablement liée à un processus d'apprentissage. Ainsi, nous avons décidé de doter cette communauté d'agents de la capacité d'apprendre et ainsi d'améliorer leur performance en terme de prise de décisions. De plus, la mise en place d'un processus d'apprentissage, défini comme « la faculté d'utiliser les effets passés de l'adaptation », se manifeste par la capacité d'atteindre plus rapidement qu'auparavant une zone de stabilité satisfaisante face à un type de perturbation extérieure.

Le système de raisonnement à partir de cas combiné avec la possibilité d'interaction avec l'environnement offre des réponses aux contraintes citées plus haut. En effet, la diminution du temps décisionnel résulte du fait que le système résout des problèmes à partir d'anciennes solutions, sans devoir recommencer le processus de construction de solutions depuis le début. Pour ce qui est de la fiabilité de la décision prise, d'une part, l'agent se rappelle des expériences précédentes et évite de répéter des erreurs commises dans le passé ; d'autre part, il profite de l'enrichissement de ses compétences via ses interactions avec les autres agents du système.

Le système d'apprentissage proposé au chapitre V, qui s'intègre à MAC1, s'appuie sur une structure d'indexation permettant un accès rapide aux cas et sur des mesures de similarité assurant une sélection des cas qui seront utilisés lors de l'affinage et de l'adaptation. Pendant ces différentes étapes, il y a possibilité de communication et d'interaction entre l'agent apprenant (lors de sa prise de décision) et ses accointances par le biais d'échange de messages.

Enfin, nous avons montré que les modèles proposés étaient adaptés à la représentation du cas d'une entreprise industrielle désirant s'adapter à l'évolution de son environnement, et répondant à ceci par une distribution de la décision et une plus grande autonomie des acteurs décisionnels.

L'utilisation de la simulation nous a permis de mettre en scène des phénomènes constatés au sein des organisations productives tels que la dynamique des comportements des acteurs décisionnels en terme de déclinaison de directives (rationalités évaluatives, rationalités structurelles, et décisions) et surtout d'apprentissage à partir d'expériences

### 3 Originalités et apports

Dans les systèmes multi-agents, les problématiques soulevées sont : la distribution des problèmes à traiter, la répartition de la connaissance sur un certain nombre d'entités distribuées et coopérantes, la coordination des comportements des entités selon des lois sociales, et l'émergence de concepts nouveaux à partir d'un caractère collectif d'entités individuelles et autonomes.

Ces problématiques rejoignent clairement les problèmes de coordination, de coopération au sein des organisations productives, le partage de la connaissance en entreprise, ainsi que la question de la gestion des conflits, du comportement social au sein d'un groupe, et du maintien de la cohérence des décisions et des plans d'actions entre le local et le global.

Le domaine des organisations productives et plus particulièrement de la prise de décision dans ces organisations est un domaine privilégié d'application de l'IAD, mais surtout un domaine d'apport exceptionnel proposant une pléiade de concepts nécessaires au renforcement de la panoplie conceptuelle de l'IAD, tels que la communication, les protocoles de négociations et la résolution de conflits, et l'émergence de comportements.

#### ***☛ Apports de nos recherches aux organisations productives***

Dans le domaine de la gestion de production et en particulier des organisations productives, l'originalité réside dans :

- ☞ La modélisation de ces organisations en une représentation sous forme d'emboîtement en niveaux successifs d'intégration de modules possédant un certain degré d'autonomie;
- ☞ La modélisation et la simulation des processus décisionnels et des phénomènes d'orientation des comportements à différents niveaux de l'organisation, par le biais de rationalités qui motivent les décisions et les actions des acteurs du système.
- ☞ L'intégration d'une technique, fruit de la répétition et de l'expérimentation (apprentissage), visant à augmenter les performances de ces organisations en exploitant leurs savoir-faire et leurs expériences pour la capitalisation des connaissances.

#### ***☛ Apports de nos recherches à l'intelligence artificielle et aux systèmes multi-agents***

- ☞ la conception d'une nouvelle architecture d'agents MAC1 qui :
  - met en avant l'aspect cognitif de l'agent, en particulier le notion de rationalités évaluative et structurelle qui sont issues des fondements théoriques de la métasystémique, et qui orientent la décision.
  - modélise le processus de raisonnement pour la prise de décision issue de la théorie de la décision proposée par Simon.
- ☞ l'intégration de deux techniques d'apprentissage à l'agent pour enrichir ses compétences :
  - le raisonnement à partir de cas qui est un apprentissage individuel et isolé qui permet à l'agent d'exploiter l'expérience accumulée dans le temps, afin de l'aider à trouver des solutions à des problèmes nouveaux, à partir de problématiques proches de celles qu'il a déjà résolues dans le passé.

⇒ l'interaction avec les accointances, qui permet de bénéficier de l'expérience des autres agents ce qui constitue un facteur essentiel pour la prise de bonnes décisions.

⇒ la validation de ce modèle d'agent via la simulation qui fournit un mécanisme d'évaluation permettant la mesure rapide et précise des performances du modèle.

## 4 Futurs travaux de recherche

Nous n'avons pas exploré l'ensemble des facettes présentes dans les modèles que nous avons proposés ainsi plusieurs développements sont envisageables :

☛ Du point de vue de la modélisation :

Dans ces travaux de recherche, nous nous sommes limités volontairement à mettre un agent par centre de décision, pour pouvoir implémenter et valider correctement nos travaux. Mais il est intéressant de noter que les modèles d'organisation productive META2 et MAC2 sont assez ouverts ; ils peuvent supporter une démarche récursive, par exemple au niveau stratégique, nous pouvons imaginer que l'agent est un agent virtuel assimilé à un comité d'administration, d'actionnaires, ou un groupement d'entreprises. Au niveau opérationnel physique, l'agent actuel peut être remplacé par un agent virtuel composé de plusieurs chefs de production par exemple. A cet agent virtuel, qui aura la même structure qu'un agent simple, seront associés des mécanismes de communication, d'interaction, et de négociation spécifiques.

Nous nous sommes rendu compte qu'il était souhaitable que cette société d'agents puisse se réorganiser dynamiquement au cours de la réalisation d'un projet productive. Les modèles proposés peuvent supporter le passage d'un apprentissage des compétences à un apprentissage organisationnel. Cette dernière permet aux organisations productives de s'auto-organiser en fonction des évolutions stratégiques de l'entreprise.

Les possibilités offertes par les modèles et la structure interne des agents n'ont pas encore été complètement exploitées. En effet, la définition des interactions entre les agents au niveau du CBR a été ambitieuse, mais n'a pas été complètement détaillée. Ceci peut faire l'objet de futurs travaux de recherche concernant la proposition d'un langage de spécification de protocoles d'interaction et de coopération lors des prises de décision et de l'apprentissage.

☛ Du point de vue génie productique :

La combinaison du simulateur SIM2, de la maquette réalisée du modèle d'agents MAC2, et d'une interface conviviale commune devrait permettre :

⇒ sur la plan du diagnostic industriel, de :

- mettre en évidence certains dysfonctionnements ;
- d'envisager certaines structures organisationnelles et leurs modes de pilotage associés;
- de capitaliser les connaissances organisationnelles.

⇒ sur le plan pédagogique, de représenter la démarche décisionnelle des étudiants dans une phase d'apprentissage et « d'extrapoler » à moyen terme les résultats de production que pourrait donner cette démarche.





## BIBLIOGRAPHIE





## BIBLIOGRAPHIE

- [Aamodt, 91] A. AOMODT. *A Knowledge Intensive Integrated Approach to Problem Solving, Sustained Learning*. PhD Thesis. Trondheim University, 1991.
- [Aamodt & Plaza, 94] A. AAMODT. ET E. PLAZA. *Case-based reasoning: foundational issues, methodological variation, and system approaches*. AI Communications 7(1), 39-59.
- [Agre & Chapman, 87] P.E. AGRE & D.P. CHAPMAN. *An Implementation of a Theory of Activity*. Proceeding of the 6<sup>th</sup> American Association on AI, Seattle, Washington, 1987, pp. 187-201.
- [Alliot et Schiex, 93] J.-M. ALLIOT & T. SCHIEX. *Intelligence Artificielle & Informatique théorique*, Cépaduès-Editions, 1993.
- [Alterman, 86] R. ALTERMAN. *An adaptive planner*. Cognitive Science 12 : 393-422.
- [Anacleto, 96] L. ANACLETO. *Points de vue sur l'apprentissage dans les systèmes multi-agents*. Journée Systèmes Multi-Agents du PRC-GDR IA, Toulouse-2 février 1996, 47-57.
- [Ansoff, 89] H. ANSOFF. *Stratégie du développement de l'entreprise*. Paris : Editions d'organisation, 1989. 287 p.
- [Anthony, 65] R. ANTHONY. *Planning and control systems : A framework for analysis*, Harvard University Press, 1965.
- [Antony, 76] R. ANTONY & J. DEARDEN. *Management control system - Text and cases*. Homewood (Illinois) : R. Irwin inc., 1976. 771 p.
- [Anzieu & Martin, 68] D.ANZIEU. J.Y. Martin. *La dynamique des groupes*, p189.
- [Archimède, 91] B. ARCHIMEDE. *Conception d'une architecture réactive distribuée et hiérarchisée pour le pilotage des systèmes de production*. Thèse de doctorat en automatique et informatique industrielle : Université de Bordeaux I, 1991. 157 p.
- [Ashley & Rissland, 88] K.D. ASHLEY. E.L. RISSLAND. *A case-based approach to modelling legal expertise*. IEEE Expert 3(3): 70-77.
- [Auriol, 95] E. AURIOL. *Integration d'approches symboliques pour le raisonnement à partir d'exemples*. Thèse de l'universit, Paris-IX, 1995.
- [Aussenac, 89] N. AUSSENAC. *Conception d'une méthodologie et d'un outil d'acquisition de connaissances expertes*. Thèse de doctorat en informatique, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1989.
- [Austin, 62] J. L. AUSTIN. *How to Do Things with Words*. Oxford University Press, 1962.

[Ayel, 91] J. AYEL et J.P. LAURENT. *Système multi-agents pour coordonner les activités de gestion de production*. Actes du 8<sup>ème</sup> congrès RFIA-AFCET, vol.1, Lyon, 25-29 nov.,1991, pp.371-379.

[Baranger, 87] P. BARANGER. *Gestion de la production*. Paris : Vuibert, 1987. 318 p.

[Bareiss, 88] E.R. BAREISS. *PROTOS: An exemplar-based learning apprentice*. International Journal of Man-Machine Studies 29 : 549-561.

[Bareiss, 89a] E.R. BAREISS. *Exemplar-based knowledge acquisition: A unified approach to concept representation, classification, and learning*. Boston: Academic Press.

[Bareiss, 89b] E.R. BAREISS. *The experimental evaluation of a case-based learning apprentice*. In proceedings.

[Bartlett, 32] F.C. BARLETT. *Remembering: a study in experimental and social psychology*. Cambridge University Press, Londres, 1932.

[Benchimol, 86] G. BENCHIMOL, P. LEVINE, et J.C. POMEROL. *Systèmes experts dans entreprise*, Paris. Ed. HERMES, Gestion et productique, mai 1986.

[Benkirane, 90] M. BENKIRANE, PH. DUMAS, B. HOURIEZ, & P. MAILLOT. *Aspects de la psychologie cognitive dans l'acquisition des connaissances*. Convention IA 90 : Actes de la deuxième conférence européenne sur les techniques et les applications de l'Intelligence Artificielle en milieu industriel et de service, Paris, 15-18 janvier, 1990, Paris : Hermes, 1990, p.607-621.

[Bentley, 75] J. BENTLEY. *Multidimensional binary search trees used for associative searching*. Communications of the ACM 18 (9), 1975, p.509-517.

[Beranger, 87] P. BERANGER. *Les nouvelles règles de la production - Vers l'excellence industrielle*. Paris : Dunod, 1987. 224 p.

[Bergson, 48] H. BERGSON. *L'évolution créatrice*, P.U.F.

[Bichindaritz & al., 91] I. BICHINDARITZ. B. SEROUSSI. *ALEXIA : un système de résolution de problèmes à partir de cas utilisant une mémoire d'exemples méta-indexée par un modèle causal*. 6<sup>ème</sup> Journées Françaises de l'Apprentissage, SETE, 1991.

[Bichindaritz, 94] I. BICHINDARITZ. *Apprentissage de concepts dans une mémoire dynamique: raisonnement à partir de cas adaptable à la tâche cognitive*. Thèse de l'Université, Paris V, 1994.

[Bisson, 93] G. BISSON. *KBG-Introduction de bases de connaissance en logique des prédicats*. Thèse de l'Université Paris-Sud Orsay, 1993.

[Bond & Gasser, 88] A.H. BOND et L.GASSER. *Reading in distributed artificial intelligence*, Morgan Kaufmann publishers, Inc, 1988.

- [Bond, 89] A.H. BOND. *Some DAI insights from Symbolic Interactionist Sociology*. Commitments, 9<sup>th</sup> International AAAI Workshop on Distributed Artificial Intelligence, 1989.
- [Bond, 90] A.H. BOND. *A Normative Model of Collaboration in Organisations. insights from Symbolic Interactionist Sociology*. Projects, 10<sup>th</sup> International AAAI Workshop on Distributed Artificial Intelligence, 1990.
- [Boose, 86] J-H. BOOSE. *ETS : A System for the Transfer of Human Expertise. Knowledge Based Problem Solving*. Edited by J. S. Kowalik. Englewood Cliff (New Jersey) : Prentice-Hall, 1986, p. 68-111.
- [Bounine & Suzaki, 89] J. BOUNINE, K. SUZAKI. *Produire juste à temps*. Masson, 1989.
- [Bouron, 92] T. BOURON. *Structures de communication et d'organisation pour la coopération dans un univers multi-agents*. These de l'université Paris 6, 1992.
- [Brachman, 90] R.J. BRACHMAN. *The future of knowledge representation*. AAAI'90 Boston Massachusetts, 1990, 1082-1092.
- [Braganza & Gasser, 87] C. BRAGANZA & L.GASSER. *MACE Multi-Agent Computing Environment, Version 6.0*. Release Note 1.0, Technical Report CRI 87-16, University of Southern, California, Etats Unis, 1987.
- [Brehmer, 91] B. BREHMER. *Distributed Decision Making. Some notes on the literature*. In J. Rasmussen, B. Brehmer, J. Leplat (Eds.). *Distributed Decision Making*, John Willey & Sons, 1991.
- [Brenker, 85] J. BRENKER. B. WIELINGA. *KADS : Structured Knowledge Acquisition for Expert Systems*. In *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop Expert Systems and their Applications*, Avignon, mai 1985.
- [Brooks, 89] R.A. BROOKS. *A Robust layered control system for mobile robot*. IEEE Journal of Robotics and Automation, volume RA-2(1), April 1986.
- [Bruneau & Pujos, 92] J-M BRUNEAU et J-F PUJOS. *Le management des connaissances dans l'entreprise : ressources humaines et systèmes d'information*, Editions d'Organisation.
- [Brunet, 91] E. BRUNET. *KADS : Méthode d'ingénierie de la connaissance*. Génie Logiciel & Systèmes Experts, 1991, N°23, p.24-34.
- [Bura, & al., 91] S. BURAT, A. DROGOUL, J. Ferber & E.Jacopin. *Eco-Résolution : Un modèle de résolution de problèmes par interaction*. Actes du 8<sup>ème</sup> congrès AFIA, vol.3, Lyon, 1991, pp. 1299-1308.
- [Burlat et al., 95] P. BURLAT, Y. OUZRUT, L. VINCENT. *A Meta-Systemic Model for the Reactiv Firm*. ETFA' 95 Conference, Paris, October 10-13. 1995, Vol. I. p. 691-700.

[Burlat, 96] P. BURLAT. *Contribution à l'évaluation économique des organisations productives : vers une modélisation de l'entreprise compétences*. Thèse Doct. : Université Lumière LYON 2, 1996. 385 p.

[Bussman & Demazeau, 94] S. BUSSMANN. Y. DEMAZEAU. *An agent model combining reactive and cognitive capabilities*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and systems (IROS'94), Munich, Germany, 1994.

[Callan & al., 91] J.P. CALLAN ., T.E. FAWCETT . & L. RISSLAND EDWINA. *Adaptive Case-Based Reasoning*. Proceeding of a Workshop on case-based reasoning (DARPA), Washington, D.C., R. Bareiss (Edt.), Morgan Kaufmann, San Mateo, California, 1991, 191-202.

[Callan & al., 92] J.P. CALLAN. T.E. FAWCETT . & L. RISSLAND EDWINA. *CABOT : An Adaptive Approach to Case-Based Search*. Proceedings of AAAI-92, Cambridge, MA, 1992, 803-808.

[Cammarata & al., 83] S. CAMMARATA., D. MCARTHUR. & R. Steeb. *Strategies of Cooperation in Distributed Problem Solving*. In proceeding of the 1983 IJCAI Conference.

[Camps, 98] V. CAMPS. *Vers une théorie de l'auto-organisation dans les systèmes multi-agents basée sur la coopération: application à la recherche d'information dans un système d'information répartie*. Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 1998.

[Carbonell, 83] J. CARBONELL. *Learning by analogy: formulating and generalizing plans from past experience*. "Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach". R. S. Mishalski, J.G. Carbonel et T.M. Mitchell (Eds.), Tiago Press, Palo Alto, CA.

[Carbonell, 86] J.G. CARBONELL. *Derivational Analogy : A Theory of Reconstructive Problem Solving and Expertise Acquisition*. Machine Learning : An Artificial Intelligence Approach. Morgan Kaufmann Publishers, 1986.

[Castelfranchi, 90] C. CASTELFRANCHI. *Social power : A point missed in multi-agent, DAI and HCI*. In Decentralized A.I. 2, éd. par Y. Demazeau et J.P. Muller, pp. 49-62. Amsterdam, NL, Elsevier Science Publishers B. V., 1990.

[Caulier & Houriez, 95] P. CAULIER. B. HOURIEZ. *Apport de la modélisation des connaissances et du raisonnement à partir de cas à la capitalisation et la réutilisation de connaissances*. Actes JAVA 95, Grenoble 1995.

[Cavaille et al. 87] CAVAILLE, J.B. et PROTH, J.M. *SIPRODIS : Pratique de la Simulation en Production Discontinue*. Nanterre: Colloques & Conseil, 1987. 333 p.

[Chaib-Draa, 89] B. CHAIB-DRAA. *Contribution à la résolution distribuée de problème : approche basée sur les comportements intentionnels des agents*. Thèse de l'université de Valenciennes, 1989.

[Charniak, 85] E. CHARNIAK., AND D. MCDERMOTT. *Introduction to artificial intelligence*. Reading. Menlo Park, CA : Addison-Wesley Publishing Company, 1985, 701 p.

- [Charniak & al., 87] F. CHARNIAK., K. RIESBECK., D. McDermott., & J.MEEHAN. *Artificial Intelligence Programming Techniques*. Lawrence Erlbaum Ass., Hillsdale, NJ, 1987.
- [Chassang & al., 84] G. CHASSANG, H. TRON. *Gérer la Production Avec l'Ordinateur*. Paris : Bordas, 1983.
- [Chouraqui, 86] E. CHOURAQUI. *Le raisonnement analogique : sa problématique, ses principes*. Journées Nationales sur l'Intelligence Artificielle, Aix-les-Bains, 20-21 Novembre, 1986. Toulouse : CEPADUES-EDITIONS, 1986, p.107-117.
- [Cohen & Levesque, 87] P.R. COHEN. H & J. LEVESQUE. *Intention = Choice + Commitment*. Proc. Of AAAI, vol.2, Seattle 1987, p.410-415.
- [Cohen & Levesque, 88] P.R. COHEN. H & J. LEVESQUE. *Intention in Choice with Commitment*. Artificial Intelligence, 1988, p.213-261.
- [Cohen & al., 89] P.R COHEN, M. GREENBERG, D.M. HART, A.E. HOWE. *Trial by fire : understanding the design requirements for agents in complex environments*. AI Magazine, 1989, pp. 32-48.
- [Cohen & Levesque, 90] P.R. COHEN. H. J. LEVESQUE. *Rational Interaction as the Basis for Communication*. AI, 42,1990, p.225-253.
- [Cohendet & al., 96] P. COHENDET, J-H JACOT et P. LORINO. *Cohérence, Pertinence et Evaluation*. ECOSIP, Gestion. Edition ECONOMICA, 1996.
- [Cohendet & Llerena, 90] P. COHENDET et P. LLERENA. *Flexibilité et évaluation des systèmes de production*. In Gestion Industrielle et Mesure Economique, Paris : Ecosip Economica, 1990. 425 p.
- [Corkill, 86] D. CORKILL., K. GALLAGHER.,& K. MURRAY. *GBB : A generic blackboard development system*. Proceedings of the 5<sup>th</sup> AAAI, Pennsylvanie, USA, 1986, p.1008-1014.
- [Cornuéjol & al., 95] A. CORNUEJOL. M. MOULET. R. VINCENT. *Dossier apprentissage symbolique automatique*. Bulletin de l'AFIA n°22, juillet 1995.
- [Coulon, 90] D. Coulon., J.F. Boisvieux., L. Bourrelley., B. Laurent & al. *Le raisonnement par analogie en intelligence artificielle*. In : Actes des 3<sup>èmes</sup> journées nationales. PRC-GDR Intelligence Artificielle, B. Bouchon-Meunier (Edt.), 1990.
- [Crozier & Friedberg, 77] M. CROZIER ET E. FRIEDBERG. *L'acteur et le système*. Editions Le Seuil, 1977.
- [Damasio, 94] A-R. DAMASIO. *Descarte's error*. Putnam's Sons, 1994.



[Dausset, 90] J. DAUSSET. *La définition biologique du soi, dans soi et non-soi*, sous la direction de J. Bernard, M. Bessis, et C. Debru, Editions du Seuil. 1990.

[Davies, 87] T.R. DAVIES. *A Logical Approach to Reasoning by Analogy*. In : Proceedings IJCAI-87

[Davis, 80] R. DAVIS. *Report on the Workshop on Distributed AI*. SIGART Newsletter 73, p.42-52, 1980.

[De Carvalho, & al., 90] DE CARVALHO F.A.T., LEBBE. J., VIGNES. R. ET E. DIDAY. *Dissimilarité en analyse de données symboliques*. XXII journées de statistiques, Tours.

[Debenham 94] J. DEBENHAM. *Object for knowledge modeling*. World Congress on Second Generation Expert Systems. Lisbon, Portugal, 1994, 979-987.

[Dejonget & Mooney, 86] G.DEJONG. ET R.MOONEY. *Explanation-Based Learning: An alternative View*, Machine Learning, 1, 1986, 145-176.

[Demazeau et al. 90] Y. DEMAZEAU et J.P. MULLER. *Decentralized artificial intelligence*, proceeding of the 1st modelling autonomous agents and multi-agents worlds, Cambridge: North-Holland.

[Demazeau, & Muller, 90] Y. DEMAZEAU, J.P. MULLER. *Decentralized artificial intelligence*. In Decentralized A.I. 2, éd. par Y. Demazeau et J.P Muller, pp. 3-13. Amsterdam, NL, Elsevier Science Publishers B. V., 1990.

[Demazeau, & Muller, 91] Y. DEMAZEAU, J.P. MULLER. *From reactive to intentional agents*. In Decentralized A.I. 2, éd. par Y. Demazeau et J.P Muller, pp. 3-10. Amsterdam, NL, Elsevier Science Publishers B. V., 1991.

[Demazeau, 95] Y. DEMAZEAU. *From interactions to collective behaviour in agent-based systems*. European conference on Cognitive Science, Saint-Malo, 1995.

[Devlin, 91] K. DEVLIN. *Logic and information*, Cambridge University Press.

[Diday, 89] E. DIDAY. *An Introduction to Symbolic Data Analysis*. Rapport de recherche. INRIA N 1937, France, 1993.

[Die & Nie, 87] T. DIE. C. NIE. *Synthèse d'objets*. Rapport de DEA. Université Paris-IX Dauphine.

[Dieng, 90] R. DIENG. *Méthodes et outils d'acquisition des connaissances*. Actes des journées ERGO-IA'90, Biarritz, 1990, p.245-271.

[Dietterich, 84] T.G DIETTERICH & R.S MICHALSKI. *A Comparative Review of Selected Methods for Learning from Examples*. Machine Learning : An Artificial Intelligence Approach. Morgan Kaufmann Publishers, p 41-81, 84.

[Doukidis & Paul, 92] G.I. DOUKIDIS et R.J. PAUL. *Artificial Intelligence in Operational Research*. Macmillan, Hampshire, UK. 1992.

[Drogoul & Ferber, 92] A. DROGOUL. J. FERBER. Multi-Agent Simulation as a Tool for Modeling Societies : Application to Social Differentiation in Ant Colonies. MAAMAW'92. Castelfranchi & Werner Eds. 1992.

[Dubois, 77] D. DUBOIS. *Limites à la modélisation des systèmes*. In Modélisation et maîtrise des systèmes techniques économiques sociaux, Actes du congrès de l'AFCET, Tome 1, 1977.

[Durfée & al., 87a] E.H. DURFEE. V.R. LESSER. D.D. CORKILL. *Coherent Cooperation Among Communicating Problem Solvers*. IEEE Transactions on Computers, C 36, 1987.

[Durfée & al., 87b] E.H. DURFEE. V.R. LESSER. D.D. CORKILL. *Cooperation through communication in a distributed problem solving network*. In. M. Huhns (Ed.), Distributed Artificial Intelligence, Pitman, 1987.

[Durfée et Montgomery, 91] E.H. DURFEE et T. MONTGOMERY. *Coordination as distributed search in a hierarchical behavior space*, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 21, no.6, 1991.

[Durieux, 92] C. DURIEUX. *Gestion de la Production et Dynamique Organisationnelle de l'Entreprise*. Grenoble (Fr) : IRPED Service des publications, mars, 1992. 501 p.

[Encyclopédie, 84] *Encyclopédie économique*. Economica, Paris, 1984, traduction de *Encyclopedia of Economics*, Douglas Greenwald ed., New York, 1982.

[Erceau & al, 94] J. ERCEAU, L. CHAUDRON, J. FERBER ET T. BOURON. *Systèmes personne(s)-machine(s) : patrimoines cognitifs distribués et mondes multi-agents, coopération et prise de décision collectives*. Dans *Système coopératifs de la modélisation à la conception*, sous direction de B. Pavard, , éditions OCTARES, Toulouse-France, 1994.

[Erceau & Ferber, 91] J. ERCEAU ET J. FERBER. *L'intelligence artificielle distribuée*. In la Recherche 233, Vol. 22 juin 1991.

[Erceau & Ferber, 93] J. ERCEAU ET J. FERBER. *Introduction aux premières journées francophones d'intelligence artificielle distribuée et systèmes multi-agents*. Premières journées IAD & SMA -Toulouse. France, 1993.

[Erman, 80] D.L. ERMAN, F. HAYES ROTH, V. LESSER & R.D. REDDY. *THE HEARSY-II speech understanding system : Integrating knowledge to resolve uncertainty*. ACM Computing Surveys 12, 1980.

[Erschler & Terssac, 88] J. ERSCHLER. G. DE TERSSAC. *Flexibilité et rôle de l'opérateur humain dans l'automatisation intégrée de production*. Toulous, rapport LAAS-CNRS, 1988.

[Erschler, 96] J. ERSCHLER. *Approche par contraintes pour l'aide à la décision et à la coopération : une nouvelle logique d'utilisation des modèles formels*. Dans *Coopération et*

Conception, sous direction de G. de Terssac et E. Friedberg, éditions OCTARES, France, 1996.

[Eshelman, 86] L. ESHELMAN & MCDERMOTT. *MOLE : A Knowledge Acquisition Tool That uses its Head*. In proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence : AAAI, Philadelphia, PA, 1986, p.950-955.

[Evan, 88] J.B. EVAN. *Structures of Discrete Event Simulation : An Introduction to the Engagement Strategy*. London : Ellis Horwood Limited, 1988. 279 p.

[Everaere et Mahieu. 91] C. EVERAERE et C. MAHIEU. *Systèmes Intégrés de Production*. In Revue Economie et Sociétés, série science et gestion, avril, 1991, n°17. p. 57-79.

[Falzon, 88] P. FALZON et W. VISSER. *Recueil et analyse de l'expertise dans une activité de conception, psychologique française*, psychologie de l'expertise, J.P. CAVERNI Ed., tome 33-3, Nov 88, pp 133-138.

[Ferguson, 92] I.A. FERGUSON. *Touring Machines : An Architecture for Dynamic, Rational, Mobil Agents*. PhD. Thesis, Clare Hall, University of Cambridge, UK, 1992.

[Farreny, 85] H. FARRENY. *Les systèmes experts : principes et exemples*, Editions Cépadues, 1985.

[Feigenbaum, 63] A. FEIGENBAUM. *The simulation of natural learning behavior*. in: Feigenbaum A., Feldman J.(eds.), *Computers and Thought*, McGraw-Hill, New York, 1963, p.297-309.

[Ferber, 85] J. FERBER. *Systèmes experts et approche orientée objets*. Les Systèmes Experts et leurs Applications, Avignon France, Mai 1985, 525-541.

[Ferber, 89] J. FERBER. *Objets et agents : une étude des structures de représentation et de communications en Intelligence Artificielle*. Thèse d'Etat, Université Paris 6.

[Ferber, 94] J. FERBER. *La Kénétique : des systèmes multi-agents à une science de l'interaction*. Revue Internationale de systémique, vol. 8, n° 1, 1994, pp 13-27.

[Ferber, 95] J. FERBER. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, InterEdition, Paris, 1995.

[Fikes, 82] R.E. FIKES. *A Commitment-Based Framework for Describing Informal Cooperative Work*. Cognitive Science 6, 1982, p. 331-347.

[Fisher, 87] D. FISHER. *Knowledge acquisition via incremental conceptual clustering*. Machine Learning. 2, 1987, 139-172.

[Foissel, 97] R. FOISSEL. V. CHEVRIER. J.P. HATTON. *De l'organisation d'une société à sa réorganisation*. Journée Systèmes Multi-Agents du PRC-GDR IA, Toulouse, 2 février 1997, 121-128.

[Forgy & Shepard, 87] C.L. FORGY. S.J. SHEPARD. *Rete: A fast match algorithm*. AI Expert, Miller Freeman Publications, 1987, (1):34-40.

[Forgy, 81] C.L. FORGY. *OPS5 User manual*. Department of Computer science, Carnegie Mellon University, 1981.

[Forgy, 82] C.L. FORGY. *RETE : A Fast Algorithm for the Many Pattern/Many Object Pattern Match Problem*. Artificial Intelligence, 1982, (19):17-37.

[Forgy, 94] C.L. FORGY. *RAL/C and RAL/C++: Rule-Based Extensions to C and C++*. OOPSLA'94: workshop on Embedded Object-Oriented Production Systems, Oregon, Portland, Octobre 1994, 11-15.

[Fouet, 97] J.M. FOUET coordonateur .*Connaissances et savoir-faire en entreprise : intégration et capitalisation*. Université d'été-1996. Editions HERMES, Paris, 1997.

[Fox, 81] M.FOX. *An Organizational View of Distributed Systems*. IEEE Trans. On Man, Systems and Cybernetics. 11(1), 1981, p. 70-79.

[Galliers, 88] J.R. GALLIERS. *A Theoretical Framework for Computer Models of Cooperative Dialog, Acknowledging Multi-agent Conflict*, Open University (UK).

[Gallois, 90] P. M. GALLOIS : *Evaluation et pilotage de la performance industrielle*, in Gestion Industrielle et Mesure Economique - Ecosip, Economica, 1990, p. 277.

[Ganascia, 91] J.G. GANASCIA. *L'hypothèse du « knowledge level » : théorie et pratique*, rapport de LAFORIA n 20.

[Gardarin, 93] G. GARDARIN. *Maîtriser les bases de données*. Modèles et langages. Eyrolles Paris, 1993.

[Gasser, 88] L. GASSER. *Distribution and coordination of tasks among intelligent agents*. Proc. of SCAI, 1988, p. 189-192.

[Gasser, 90] L. GASSER. *Social conceptions of knowledge and action*. Technical Report ACT-AI- 355-90, MCC, october 1990.

[Gasser, 92] L. GASSER. *An overview of DAI*. In : DAI : Theory and Praxis, éd. par N. M. Avouris et L. Gasser, Amsterdam, NL, Kluwer Academic Publishers, 1992.

[Gebhardt, 89] F. GEBHARDT. *Choosing among competing generalisations*. Arbeitspapiere des GMD, n° 421.

[Genelot, 92] D.GENELOT. *Manager dans la complexité*. Paris : INSEP Editions, 1992. 328 p.

[Gentner, 83] D. GENTNER. *Structure-Mapping : A Theoretical Framework for Analogy*. Cognitive Science, vol. 7, pp. 155-170.

[Georgeff & Lansky, 87] M.P. GEORGEFF and A.L. LANSKY. *Reactive reasoning and planning*. Proc. of The Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87), pp. 677-682, Seattle, WA, 1987.

[Giard, 81] V. GIARD. *Gestion de la production : Calcul économique*. Edition ECONOMICA, 1981.

[Giard, 88] V. GIARD. *Gestion de la production*. Paris : Economica, 1988. 1068 p.

[Gibert, 89] M. GIBERT. *L'intégration des systèmes de production*. Lyon: PUL, 1989. 251 p.

[Gineste et Indurkha, 93] M.D. GINESTE & B. INDURKHYA. *Modèles mentaux, analogie et cognition*. In : Les modèles mentaux, approche cognitive des représentations, M.F. Ehrlich, H. Tardieu et M.Cavazza (Edts.), Masson, Paris, 1993,143-173.

[Goldman & Rosenschein, 95] C. GOLDMAN. J.S ROSENSCHEIN. *Mutually Supervised Learning in Multiagent Systems*. 14<sup>th</sup> IJCAI 95, Workshop on Adaptation and Learning in Multiagent Systems, Montreal, CANADA, 1995.

[Gory & Scott Morton, 71] G. GORY et M. SCOTT MORTON. *Framework for management information systems*, Sloan management review, 1971.

[Gowda & Diday, 91] K.C GOWDA & E. DIDAY. *Symbolic clustering using a new dissimilarity measure*. Pattern recognition Letter 24.

[Guessoum, 96] Z. GUESSOUM. *Un environnement opérationnel de conception et de réalisation de systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Université P. et M. Curie, Paris 6, 1996.

[Hammer & al., 93] M. HAMMER et J. CHAMPY. *Le Reengineering : Réinventer l'entreprise pour une amélioration spectaculaire de ses performances*. Traduit de l'américain par Michel Le Seach. Edition DUNOD, Paris 1993.

[Hammond, 86] K. HAMMOND. *Case-based planning: an integrated theory of planning, learning and memory*. Thèse de Yale university, New Haven, Connecticut.

[Hammond, 88] K.J HAMMOND. *Case-Based Planning*. Proceedings: Workshop on case-based reasoning (DARPA), clearwater, Florida, J.L. Kolodner (Edt.), Morgan Kaufmann, San Mteo, California, 1988, 17-20.

[Hammond, 90] K.J HAMMOND. *Case-Based Planning: A Framework for Planning from Experience*. Cognitive science,14,1990, 385-443.

[Hannoun & al., 98] M. HANNOUN. J.S. SICHMAN. O. BOISSIER. C. SAYETTAT. *Dependence Relations between Roles in a Multi-Agent System : Towards the detection of Inconsistencies in Organization*. Sichman, conte and Gilbert (eds) : Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, LNAI series, volume 1534, pp. 169-182, Berlin, Springer-Verlag.

- [Harmon, 93] P. Harmon. *Case-based reasoning*. Edited by P. Harmon. N°5. Airlington (MA) : Cutter Information Corp., 1993, p.28.
- [Haurat, 95] A. HAURAT. *De la nécessité de maîtriser l'informaion*. Dans la modélisation systémique en entreprise, Coord. C. Braesch et A. Haurat, chapitre 9, 1995.
- [Hax & Candea, 83] A.C. HAX. & D. CANDEA. *Production and Inventory Management*. Prentice Hall, Inc., 1983.
- [Hayes-Roth, 85] B. HAYES-ROTH. *Blackboard architecture for control*. Artificial Intelligence 26 : 251-321, 1985.
- [Hayes-Roth, 88] B. HAYES-ROTH & M. HEWETT. *Building systems in the blackboard architecture*. In Blackboard Systems, R. Englemore and A. Morgan(eds.), Addison-Mesley, London, 1988.
- [Hewitt, 77] C. HEWITT. *Viewing control structures as patterns of passing messages*. Artificial Intelligence 8(3) : 324-364, 1977.
- [Hill, 93] D.R.C. HILL *Analyse orientée objets et modélisation par simulation*. Addison-Wesley, France, 1993.
- [Hoc, 87] J.M. HOC. *Psychologie cognitive de la planification*. PUG, Grenoble, 1987.
- [Hollard, 94] M. HOLLARD. *Génie industriel : les enjeux économiques*. PUG, 1994.
- [Huberman & al., 94] B. HUBERMAN et T. HOGG. *Communities of Praticce : Performance and evolution*. Rapport technique, Xerox Palo Alto, Octobre 1994.
- [Huguet, al., 96] M-J. HUGUET. G. DE TERSSAC. J. ERSCHLER. N. LOMPRES. *De la réalité à la modélisation de la coopération en gestion de production*. Dans Coopération et Conception, sous la direction de G. de Terssac et E. Friedberg, Editions Octares, 1996.
- [Huhns, 87] M.N. HUHNS. *Distributed Artificial Intelligence*. Pitman Publishing-Morgan Kaufman, 1987.
- [Huhns, 95] M. HUHNS. A Multi-Agent Environment for department of Defense Distribution. 14th IJCAI 95, Workshop on Adaptation and Learning in Multi-Agent Systems. Montreal, Canada, 1995.
- [Ichino, 91] M. Ichino. *Generalized Minkovski metrics for mixed features-type data analysis*. Trans. IEICE Japan J72-1.nø2, 223-270.
- [Iffenecker, 92] C. IFFENECKER. *Un système multi-agents pour le support des activités de conception de produit*. Thèse de l'université Paris VI, Decembre 1992.
- [Jardine & Sibson, 71] JARDINE. SIBSON. *Mathematical taxonomy*. John Wiley and Sons.

[Kabachi & al., 97a] N. KABACHI. Y. OUZROUT. L. VINCENT. Learning for Decision Making in Multi-Agent Systems. IASTED International Conference : Artificial Intelligence and Soft Computing. July 27 - August 1, 1997, Banff, Canada.

[Kabachi & al., 97b] N. KABACHI. Y. OUZROUT. L. VINCENT. A Society of Agents for Decision Making in Productive Organizations. 7th Mini Euro Conference on Decision Support Systems Groupware Multimedia Electronic Commerce. March 24-27, 1997, Bruges, Belgium.

[Kabachi & al., 97c] N. KABACHI. PH. BEAUNE. P. BURLAT. *Apprentissage de la Firme : des Théories Economiques aux Méthodes d'Intelligence Artificielle*. VII th Conference of the International Association for the Developpment of Interdisciplinary Research (AIDRI) : Learning from natural principles to artificial methods. June 23-26, 1997, University of geneva, switzerland.

[Kayser, 84] D. KAYSER. *Examen des diverses méthodes utilisées en représentation des connaissances*. Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (AFCET RFIA'84), 1984, 115-144.

[Kayser, 85] D. KAYSER. *La Représentation des Connaissances : un cas typique de collaboration interdisciplinaire*. Cognitiva, 1985, 307-315.

[Kayser, 85] D. KAYSER. *La Représentation des Connaissances : un cas typique de collaboration interdisciplinaire*. Cognitiva, 1985, 307-315.

[Kodratoff, 86] Y. KODRATTOFF. *Leçon d'Apprentissage Symbolique Automatique*. Toulouse : Cepadues(Ed.), 1986, 191 p.

[Kodratoff & Ganascia, 86] Y. KODRATTOFF., & J.G. GANASCIA. *Improving the generalization step in learning*, in : R. Michalski., J. Carbonell., & T. Mitchell (eds.), *Machine Learning : An Artificial Intelligence Approach*, Volume 2, Morgan Kaufmann Pub., 1986.

[Kodratoff, 91] Y. KODRATTOFF. ET E. DIDAY. *Induction symbolique et numérique à partir de données*. Cepadues(Ed.), Toulouse.

[Koenig, 93] G. KOENIG. *Les théories économiques de la firme*. Economica, 1993, p. 45.

[Kolodner & al., 85] J.L. KOLODNER. R.L. SIMPSON. C.K. SYCARA. *A Process Model of Case-Based Reasoning in Problem Solving*. In : *Proceedings IJCAI 85*, Los Angeles, CA, 1985.

[Kolodner & Riesbeck, 86] J.L. KOLODNER. C.K. RIESBECK. *Experience, memory, and reasoning*. Nothvale, NJ: Erlbaum.

[Kolodner & Simpson, 89] J.L. KOLODNER & R.L. SIMPSON. *The MEDIATOR: Analysis of an Early Case-Based Problem Solver*. *Cognitive-science*, Vol. 13, n° 4, pp 507-549, 1989.

[Kolodner, 87] J.L. KOLODNER & R.M. KOLODNER. *Using experience in clinical problem solving: introduction and framework*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 17: 420-431.

[Kolodner, 88a] J.L. KOLODNER. *Extending Problem Solver Capabilities Through Case-Based Inference*. In : Proceedings of a Workshop on Case-Based Reasoning (DARPA), Clearwater, Florida, J. L. Kolodner (Edt), Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, California, 1988, pp 21-31.

[Kolodner, 88b] J.L. KOLODNER. Proceeding : Workshop on case-based reasoning(DARPA), clearwater, Florida. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.

[Kolodner, 91a] KOLODNER. J.L. *Improving Human decision making through case-based decision aiding*. AI Magazine, summer, pp 52-68.

[Kolodner, 91b] KOLODNER. J.L. *Case-Based Reasoning and Learning : Introduction to CBR methods*. School of Information and Computer Science, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1991.

[Kolodner, 91c] KOLODNER. J.L. *Selecting the Best Case for a Case-Based Reasoner*. Conference of the cognitive Science Society, 1991.

[Kolodner, 93] KOLODNER. J.L. *Case-Based Reasoning*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, California, 1993.

[Kornfeld & al. 81] W. KORNEFELD & C. HEWITT. *The scientific Community Metaphor*. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1981.

[Koton, 88] KOTON. P. *Reasoning about Evidence in Causal Explanation*. Proceeding of AAAI-88, pp 256-261, 1988.

[Krisch, 93] Ph. KRISCH L. MAESANOE. RABEAUX. *KADS : méthode et atelier pour la modélisation des connaissances*. Génie Logiciel & Systèmes Experts, 1993, n° 31, pp. 36-40.

[Krivine, 91] J.P. KRIVINE. J.M. DAVID. *L'acquisition des connaissances vue comme un processus de modélisation : méthodes et outils*. Intellectica 1991.

[Laasri, 87] H. LAASRI, B. MAITRE, T. MONDOT, F. CHARPILLET, & J. P. HATON. *ATOME : A Blackboard Architecture with Temporal and Hypothetical Reasoning*. In Proceedings of the 8<sup>th</sup> European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-88), p. 5-10, Munich, W. Germany, August 01-05,1988.

[Labidi et al. 93] S. LABIDI, W. LEJOUAD. *De l'IAD aux SMA*, rapport de recherche n 2004 INRIA-Sophia Antipolis.

[Lachaud & al., 94] J-P LACHAUD. G. BEUGNON. J-L DENEUBOURG. S. GOSS. *Les mécanismes auto-organisationnels dans la coopération et la prise de décision collective*. Dans systèmes coopératifs : de la modélisation à la conception, sous la direction de B. Pavard, Editions Octares, 1994.



- [Lalande, 88] A. LALANDE. *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*. PUF, Paris, 1988.
- [Laurière 86] J.L. LAURIERE. *SNARK : un langage déclaratif*. Technique et Science Informatique (TSI), 1986, 5(3):141-172.
- [Laurière, 82] J.L. LAURIERE. *Représentation et utilisation des connaissances*, 1ère partie: Systèmes Experts, TSI Vol 1, n 1, 1982.
- [Laurière, 88] J.L. LAURIERE. *Intelligence Artificielle, Représentation des connaissances*. Tome 2, Eyrolles Paris, 1988.
- [Le Moigne, 74] J.L. LE MOIGNE. *Les systèmes de décision dans les organisations*, PUF.
- [Le Moigne, 84] J.L. LE MOIGNE. *La théorie du système général (théorie de la modélisation)*. Deuxième édition, Paris : PUF, 1984. 338 p.
- [Le Moigne, 90] J.L. LE MOIGNE. *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod.
- [Le Strugeon, 95] E. LE STRUGON, M. GRISLIN, & R. MANDIAU. *Application of DAI organizational techniques to men-machines cooperation*. IFAC MMS, MIT, USA, juin 1995.
- [Leake, 96] D. LEAKE. *CBR in context : the present and future*. In Leake (ed.), *Case Based Reasoning : Experiences, Lessons and Future Directions*, AAAI Press, 1996.
- [Lebel, 77] J. LEBEL. *La dynamique des systèmes, analyse et synthèse*, in *Modélisation et maîtrise des systèmes techniques économiques sociaux*, Actes du congrès de l'AFCET, Tome 1, 1977, p. 237.
- [Lespérance et al., 95] Y. LESPERANCE, H.J. LEVESQUE et F. LIN. *Fondements d'une approche logique à la programmation d'agents*, in 3ème Journées Francophones sur l'IAD & les SMA, St-Baldolph, France 15-17 mars.
- [Lind, 85] M. LIND. *Decision models and the design of knowledge based systems*. Intelligence Decision Support in Process Environments. NATO, ASI, vol F 21, San Maniato, 1985.
- [Lorange, 93] P. LORANGE. *Cooperative Strategies : Planning and Control Considerations*. In *Strategic Planning and Control : Issues in the Strategy Process*, Blackwell Publishers, 1993.
- [Lorino, 90] P. LORINO. Le projet Cost Management System du CAM-I et ses fondements" in *Gestion Industrielle et Mesure Economique - Ecosip*, Economica, Paris, 1990.
- [Lorino, 91a] P. LORINO. *Le contrôle de gestion stratégique*. Paris : Dunod, 1991.
- [Lorino, 91b] P. LORINO. *L'économiste et le manager*, Editions La Découverte, Paris, 1991.

[Lorino, 95] P. LORINO. *Comptes et Récits de la Performance : Essai sur le pilotage de l'entreprise*, Editions d'organisation, Paris, 1995.

[Muller & Pischel, 94] J-P MÜLLER & M. PISCHEL. *Modelling reactive behaviour in vertically layered agent architectures*. Pro. Of ECAI'94, Amsterdam, (NL), p.709-713, 1994.

[Malone& Crowston, 90] T.W. MALONE et K. CROWSTON. *What is coordination theory and how it can help design cooperative work systems*, proceedings of the Conference on Computer-Supported Cooperative Work, Tora Bikson and frank Halasz editors, pp 357-370.

[Malone, 87] T.W. MALONE. *Modeling coordination in organisations and markets*. Management Science, vol.33, n°10, Oct., 1987,p.1317-1332.

[Malone, 88a] T.W. MALONE. *What is coordination theory*, in National Science Foundation Coordination Theory Workchop, MIT, 1988.

[Malone, 88b]T.W. MALONE. *Modeling cooperation in organizations and markets*, in reading in distributed artificial intelligence, A.H. BOND et L.GASSER, (Eds) Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1988.

[Manabu,88] I. MANUBU. *General metrics for mixed features-the cartesian space theory for pattern recognition*. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetic 1, 494-497.

[March & Simon, 58] J.G MARCH & H.A. SIMON, Organisations, Wiley, New York, ( les organisations, systémique, Dunod, 1991, en français).

[March & Simon, 74] J. MARCH et A.H. SIMON. *Les Organisations*, Dunod, Paris, 1974.

[Masini & al., 89] G. MASINI, A. NAPOLI, D. COLNET, D. LEONARD & K. TOMBRE. *Les langages à objets : Langages de classes, langages de frames, langages d'acteurs*. InterEdition Paris, 1989

[Mataric, 94] M.J. MATARIC. *Interaction and Intelligent Behavior*. PHD of Philosophy Massachussetts Institute of Technology. May 1994.

[Mataric, 95] M.J. MATARIC. *Learning in Multi-Robot Systems*. 14<sup>th</sup> IJCAI 95 Workshop on Adaptation and Learning in Multiagent Systems, Montreal, CANADA, 1995.

[Mataric, 96] M.J. MATARIC. *Learning in Multi-Robot Systems*. Lecture Notes in AI-n° 1042- 1996.

[Maurice-Demourieux & al., 93] M. MAURICE-DEMOURIOUX. B. LAASRI. C. LEVALLET. S. PINSON. *Le raisonnement de cas : panorama et modélisation dynamique*. Séminaire Raisonnement à partir de cas. S. Rougegrez, LAFORIA 93/42.

[Mélèse, 79] J. MELESE. *Approche systémique des organisations : vers l'entreprise à complexité humaine*, Homme et Techniques.

[Mélèse, 91] J. MELESE. *L'analyse modulaire des systèmes*. Paris : Les Editions d'organisation, 1991. 235 p.

[Menu, 94] J. MENU. *Compilateurs avec C++. Du concept à la réalisation avec des langages objets*. Addison-Wesley France, 1994.

[Mercé, 87] C. MERCE. *Cohérence des décisions en planification hiérarchisée*. Thèse d'état : Science, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1987. 179 p.

[Mévellec, 96] P. MEVELLEC. *Modèle d'entreprise et système de calcul de coûts*. In cohérence, Pertinence et Evaluation. P. Cohendet, J.H. Jacot et P. Lorino (Eds), Paris : ECOSIP, Gestion. Edition ECONOMICA, 1996, p. 181-206.

[Micaelli, 94] J.P. MICAELLI. *Contribution à une ingénierie économique des systèmes de production: fondements et expérimentation*, thèse de doctorat en sciences économiques, Université Lumière Lyon 2.

[Michalski & al, 84] R.S. MICHALSKI., J.G. CARBONELL. & T.M. MITCHELL. (Edts.), *Machine Learning : An Artificial Intelligence Approach*. Volume 1. Springer-Verlag, Berlin, 1984.

[Michalski & Stepp, 82] R.S. MICHALSKI. R. STEPP. *Learning from observation : conceptual clustering*. Machine Learning. R.S. 1982.

[Michalski, 86] R.S. MICHALSKI. *Theory and Methodology of Inductive Learning*. Machine Learning : An Artificial Intelligence Approach. Edited by R.S. MICHALSKI. Los Angeles (CA) : Morgan Kaufmann Publishers, 1986.

[Mignot, 94] H. MIGNOT. *La recherche en raisonnement à partir de cas en France*. Bulletin de l'AFIA, n° 18, dossier Raisonnement à partir de cas, 1994

[Mille, 95] A. MILLE. *Raisonnement basé sur l'expérience pour coopérer à la prise de décision : un nouveau paradigme en Supervision Industrielle*. Thèse de doctorat, Université de Saint Etienne, 1995.

[Minsky, 75] M. MINSKY. *A Framework for Representing Knowledge*. The psychology of Computer Vision. P. Winston (ed). McGraw-Hill New York, 1975, 211-281.

[Minsky, 86] M. MINSKY. *The Society of Mind*. Basic Books.1986 ( La société de l'esprit, Inter Edition, 1988 en français).

[Minsky, 88] M. MINSKY. *La société de l'Esprit*. InterEdition, 1988.

[Minsky, 94] M. MINSKY. *A Conversation with Marvin Minsky*. Communication of the ACM, vol.37, n°7, p.23-29, Juillet 1994.

[Mintzberg et al. 76] H.MINTZBERG, D.RAISINGHANI et A. THEORET. *The structure of instructed decision processes*, Administrative Science Quarterly, 21,1976.

[Mintzberg, 79] H. MINTZBERG. *The structuring of organizations: a synthesis of the research*, Prentice-Hall.

[Moati & Mouhoud, 93] P. MOATI et E. MOUHOUD. *Information et organisation de la production : vers une division cognitive du travail*, Cahier de recherche du CREDOC, avril 1993.

[Moraitis, 94] P. MORAITIS. *Paradigme multi-agent et prise de décision distribuée*. Thèse de doctorat en informatique, université Paris-Dauphine.

[Morin, 77a] E. MORIN. *Le système, paradigme et / ou théorie*. In *Modélisation et maîtrise des systèmes techniques économiques sociaux*. Actes du congrès de l'Afcet, Suresnes (Fr) : Editions Hommes et Techniques, 1977, Tome 1. p. 44-53.

[Morin, 77b] E. MORIN. *La méthode (1) : la Nature de la Nature*. Le seuil. 1977.

[Morin, 91] E. MORIN. *La méthode (4) : Les Idées. Leur habitat, leur vie, leurs moeurs*. Le seuil, 1991.

[Mostow & Fisher, 89] J. MOSTOW & G. FISHER. *Replaying transformational derivations of heuristic search algorithms in DIOGENES*. proceeding.

[Muller & Pischel, 94] J-P MÜLLER & M. PISCHEL. *Modelling reactive behaviour in vertically layered agent architectures*. Pro. Of ECAI'94, Amsterdam, (NL), p.709-713, 1994.

[Mylopoulos, 91] J. MYLOPOULOS. *Object-Oriented Knowledge Representation*. Object-Oriented Databases: Analysis, Design & Construction (DS-4), R.A. Meersman, W Kent & S. Khosla (eds.). Elsevier Science Publishers North Holland, 1991, 23-37.

[Napoli, 92] A. NAPOLI. *Représentation à objet et raisonnement par classification en Intelligence Artificielle*. Thèse d'état Nancy 1, Janvier 1992.

[Napoli, 94] A. NAPOLI. *Catégorisations, raisonnement par classification et raisonnement à partir de cas*. Actes des JFA, Strasbourg, pp. E1-E14, 1994.

[Neubert, 97]. G. NEUBERT. *Contribution à la spécification d'un pilotage proactif et réactif pour la gestion des aléas*. Thèse de doctorat en productique : INSA de Lyon, 1997. 260 p.

[Newell, 82] A. Newell. *The knowledge level*. Artificial Intelligence, 1982, (18):1-20

[Nicolet et al. 84] J.L NICOLET et J.CELIER. *La fiabilité humaine dans l'entreprise*, Edition Masson.

[Nii, 86] H. P. NII. *Blackboard Systems*. Stanford University, 1986, KSL 86-18.

[Nilsson, 94] N. NILSSON. *Teleo-reactive programs for agent control*. Journal of Artificial Intelligence, vol. 1, pp. 139-158, 1994.

- [Ocelllo & Demazeau, 94] M. OCCELLO, Y. DEMAZEAU. *Building real time agents using parallel blackboards and its use for mobile robotics*. In Proceedings of the IEEE International Conference on systems, Man and Cybernetics. San Antonio, TX, october 1994.
- [Okongwu, 90]. U. OKONGWU. *Contribution à la formalisation du concept de flexibilité des systèmes industriels, étude de cas pratique*. Thèse de doctorat : INP Lorraine, 1990. 429 p.
- [O'Neill & al., 88] M. O'Neil, A. Glowinski & J. Fox. *Decision making in the Oxford system of medecine*. Les Systèmes Experts et leurs Applications, Avignon France, 1988, 773-777.
- [Ouzrout et al. 96] Y. OUZROUT, N. KABACHI & L.VINCENT. *Application des Systèmes Multi-Agents à la Simulation d'Organisations Productives*. Journée du Programme de Recherche Coordonnées-Intelligence Artificielle sur les Systèmes Multi-Agents, Toulouse, 02 Février 1996. p. 81-92.
- [Ouzrout, 96] Y. OUZROUT. *Modélisation et simulation d'organisations productives réactives : une approche multi-agents*. Thèse de doctorat en productique : INSA de Lyon, 1997. 253 p.
- [Pachet, 92] F. PACHET. *Représentation des connaissances par objets et règle : le système NéOpus*. Thèse de doctorat de l'université Paris VI, Septembre 1992.
- [Patterson 90] D.W. PATTERSON. *Introduction to Artificial Intelligence and Expert Systems*. Prentice Hall New Jersey, 1990.
- [Pattison & al., 87] H.E. PATTISON, D. CORKILL., & V.LESSER. *Instantiating Descriptions Organisational Structures*. In Distributed Artificial Intelligence, M. Huhns(Ed.), Pitman.
- [Pavard, 94] B. PAVARD. *Systèmes coopératifs : de la modélisation à la conception*. Editions Octares, 1994.
- [Pegden, 90] P.D. PRGDEN. R. E. SHANNON. R.P. SADOWSKI. *Introduction to SIMAN*. System Modeling Corporation, Pennsylvania, 1990.
- [Pitrat, 90] J. PITRAT. *Métaconnaissance*. Future de l'intelligence artificielle, Editions Hermes.
- [Pomerol, 94] J-CH. POMEROL. *Des préférences au choix, des mathématiques à l'intelligence artificielle : le monde de l'aide à la décision*. Rapport LAFORIA n° 94/ 20. Paris 1994.
- [Pomerol, 96] J-CH. POMEROL. *Artificial intelligence and Human Decision Making*. Rapport LAFORIA n° 96/ 10. Paris 1996.
- [Potet, 90] A. POTET. *Etude d'un système à logique épistémique et temporelle. Application aux univers multi-agents*. Thèse de doctorat, ENSM, Nantes, Novembre 1990.

[PRC-GDR, 92] *Pôle et lieu d'échange en IAD. Vers une taxinomie du vocabulaire pour les systèmes multi-agents*. In journée Systèmes Multi-Agents PRC-GDR Intelligence Artificielle. Nancy, décembre 1992.

[Quinlan, 83] J. QUINLAN. Learning efficient classification procedures. 1983

[Quinlan, 86] J. QUINLAN. *Introduction of decision trees*. Machine Learning 1(1), 1986, p.81-106.

[Ram, 93] A. RAM. *Indexing, Elaboration and Refinement : Incremental Learning of Explanatory Cases*. In Case-Based Reasoning, J. L. Kolodner (Edt), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1993.

[Rao & Georgeff, 92] A. RAO & M. GEORGEFF. *Social Plans : Preliminary Report*. In Decentralized AI 3-Proc.of MAAMW'91, E. Werner et C. Castelfranchi (Ed.), p. 127-146, Elsevier, North Holland.

[Rasmussen, 83] J.RASMUSSEN. *Skills, rules and knowledge, signals, signs, and symbols an other distinctions in human performance models*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1983, Vol. 13. p. 255-266.

[Rasmussen, 85] J. RASSMUSSEN. The role of hierarchical knowledge representation in decision making and system management. IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, Vol SMC-15, n°2, 1985.

[Rasmussen, 86] J. RASSMUSSEN. *Information processing and human-machine interaction : an approach to cognitive engineering*. North-Holland, 1986.

[Reichgelt, 90] H. REICHGELT. *Different styles of agent architectures*. Proceedings of the 1<sup>st</sup> belief representation and agent architectures workshop, Cambridge, Galliers J.R. (ed.), Mai 1990, p. 29-39.

[Rodriguez, 94] M. RODRIGUEZ. *Modélisation d'un agent autonome : Approche constructiviste de l'architecture de contrôle et de la représentation de connaissances*. Neuchâtel, Suisse, thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, 1994.

[Roger, 81] P. ROGER. *Gestion de production.*, Editions Dalloz-Sirey, 1992.

[(de) Rosnay, 75] J. de ROSNAY. *Le microscope (vers une vision globale)*. Le seuil, Paris, 1975, 305p.

[Rougegrez-Loriette, 94] S. ROUGE GREZ-LORIETTE. *Prédiction de processus à partir de comportements observés: les systèmes REBECAS*. Thèse de l'université Paris 6, 1994.

[Sandholm & al., 95] T.W. SANDHOLM. R.H. CRITES. *On Multiagent Q-Learning in a semi-competitive Domain*. 14<sup>th</sup> IJCAI 95 Workshop on Adaptation and Learning in Multiagent Systems, Montreal, CANADA, 1995.

- [Savoyant, 84] A. SAVOYANT. *Définition et voies d'analyse de l'activité collective des équipes de travail*. Cahiers de psychologie Cognitive, 4, pp. 273-284, 1984.
- [Schael, 97] T. SCHAEEL. *Théorie et pratique du WORKFLOW : des processus métier renouvelés*. Editions Springer, 1997.
- [Schank & Abelson, 77] R. SHANK & R. ABELSON. *Scripts, plans, goals and understanding*. Nothvale, NJ: Erlbaum.
- [Schank & Riesbeck, 89] R. SHANK & C.K. RIESBECK. *Inside Case Based Reasoning*. LEA Publishers, Hillsdale, New Jersey 07642.
- [Schank, 73] R.C. SHANK. *Identification of Conceptualizations Underlying Natural Language*.
- [Schank, 82] R. SHANK. *Dynamic memory: A theory of learning in computers and people*. New york: Cambridge Univ. Press.
- [Schmidt, 91] K. SCHMIDT. Cooperative Work : A Conceptual Framework. In Distributed Decision Making : Cognitive Models for Cooperative Works. J. Rasmussen, B. Brehmer and J. Leplat (Eds.) John Wiley & Sons Ltd, pp. 75-110, 1991.
- [Searle, 69] J.R. SEARLE. *Speech acts*, Cambridge university Press, (Herman 1972 en français).
- [Searle, 79] J.R. SEARLE. *Expression and Meaning*. Chapter 1 : Taxonomy of Illocutionary Acts. Cambridge University Press. Les éditions de minuit 1985, en français.
- [Searle, 83] J.R SEARLE. *Intentionality : An Essay in the philosophy of mind*, Cambridge University Press, New York.
- [Searle, 90] J.R SEARLE. *Intention in communication*, chapter 19 : Collective Intentions and actions, pages 401-415. MIT Press, London.
- [Sekarane & Sen, 94] SEKARAN MAHENDRA & SEN SANDIP. *Multi-agent learning In Non Cooperative Domains*. ECIA 94.
- [Sen, 94] SEN SANDIP, SEKARAN MAHENDRA, ET HALE JONES. *Learning to coordinate without sharing information. Workshop on Adaptation and Learning in Multi-Agent Systems- IJCAI 1995-August 20-25 1995, Montreal, Canada*.
- [Shaw & Whinston, 89] M.J. SHAW & A.B. WHINSTON . Learning and Adaptation in DAI. In Gasser and Huhns, 1989, 413-427.
- [Shoham, 93] Y.SHOHAM. *Agent-oriented programming*. Artificial Intelligence 60, 1993, p139-159.

[Sian, 91] S.S. SIAN. *Adaptation Based on cooperative Learning in MAS*. Proceeding of the second workshop on modelling Autonomous Agents in Multi-Agent World-Editors Y. Demazeau & J-P Muller-Editions North Holland, 1991.

[Sichman, 95] J. S. SICHMAN. *Du Raisonnement Social Chez les Agents : Une Approche Fondée sur la Théorie de la Dépendance*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1995.

[Simon, 60] H.A. SIMON. *The new science of management decision*. Harper & Row, New York, 1960.

[Simon, 74] A. H. SIMON.: *La science des systèmes, science de l'artificiel*, Epi Editeurs, Paris, 1974.

[Simon, 77] A. H. SIMON. *The new science of management decision*. Revised edition, (first edition 1963), Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

[Simon, 80] A. H. SIMON. *Le nouveau management - La décision par les ordinateurs*. Paris : Economica, 1980. 159 p.

[Simoudis & Miller, 91a] E. SIMOUDI & J.S. MILLER. *The Application of CBR to Help Desk Applications*. In : Proceeding of a Workshop on Case-Based Reasoning (DARPA), Washington, D. C., R. Bareiss (Edt), Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, California, 1991, pp 25-37.

[Simoudis & Miller, 91b] E. SIMOUDI & J.S. MILLER. *Validated Retrieval in Case-Based Reasoning*. In : Proceeding of AAAI-91, Cambridge, MA, 1991, pp 310-315.

[Slade, 91] SLADE S. *Case-Based Reasoning : A Research Paradigm*. AI Magazine, pp 42-55.

[Sleeman, 92] D. SLEEMAN. *Artificial Intelligence: Achievements and Promesses*. Artificial Intelligence, D. Sleeman & N.O. Bensem (eds.), Hove, UK ; Hillsdale, USA : L. Erlbaum Associates, 1992, 1-25.

[Smith, 80] R.G. SMITH. *The Contract net Protocol : High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver*. IEEE Transactions on Computers vol. 29, n°12, p.1104-1113.

[Smyth & Keane, 95] B. SMYTH., & M. KEANE. *Remembering to forget : a competence-preserving case deletion policy for case-based reasoning systems*, International Joint Conference on Artificial intelligence (IJCAI), 1995, p.377-382.

[Sperber & Wilson, 86] D. SPERBER & D. WILSON. *Relevance Communication and Cognition*. Editions de minuit en français, 1986.

[Sycara & Navinchandra, 91a] K. SYCARA. D. NAVINSHANDARA. *Index transformation techniques for facilitating creative use of multiple cases*. Proceedings of IJCAI-91. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.



[Sycara & Navinchandra, 91b] K. SYCARA. D. NAVINSHANDARA. *Influences: A thematic abstraction for creative use of multiple cases*. Proceedings bareiss 91.

[Sycara, 88] K. SYCARA. *Using Case-Based Reasoning for plan adaptation and Repair*. In proceeding : Workshop on cased based reasoning (DARPA), Clearwater, Florida, J.L. Kolodner (Edt., Morgan Kaufmann, San Mateo, California, 1988, 425-434.

[Sycara, 89] SYCARA, K., ET NAVINSHANDARA, D. Integrating case-based reasoning and qualitative reasoning in engineering design. In Artificial intelligence in engineering design, ed. J.Gero. U.K.: Computational Mechanics Publications.

[(de) Terssac & Lompré, 94] G. DE TERSSAC. N. LOMPRES. *Coordination et coopération dans les organisations*. Dans systèmes coopératifs : de la modélisation à la conception, sous la direction de B. Pavard, Editions Octares, 1994.

[Thayse & al, 91] A. THAYES., PH. DELASTRE., J. HAGELSTEIN., & AL. *Approche logique de l'intelligence artificielle*. Vol.4 : De l'apprentissage artificiel aux frontières de l'IA. Paris : Dunod, 1991.358p.

[Thiel, 93] D. THIEL. *Management Industriel, une approche par la simulation*. Paris : Economica, 1993. 233 p.

[Tiberghien, 94] G. TIBERGHIE. *Psychologie de la mémoire humaine*. Sciences humaines, 1994, N°43, p.25-28.

[Tversky, 77] A. TVERSKY. *Features of similarity*. Psychological review, n° 84, 327-352.

[Unland & Schlageter, 92] R. UNLAND & G. SCHLAGETER. *Object-Oriented Database Systems: State of the art and Research problems*. EXPERT DATABASE SYSTEMS, Ed. Keith Jefferey, Academic Press Inc. London-San Diego-New York-Boston-Sidney-Tokyo, 1992, 117-222.

[Vailly & Simon, 87] A. VAILLY and M-A. SIMON. *Des systèmes experts coopérants, pourquoi, comment ?* In Cognitiva 87 AFCET, p. 183-188, Paris, 1987.

[Van Gigch, 74] J. P. VAN GIGCH. *Applied General System Theory*, Harper & Row publishers, New York, 1974.

[Van Gigch, 87] J. P. VAN GIGCH. *Decision making about decision making : Metamodels & meta systems*, Abacus Press, Cambridge, Mass., 1987.

[Van Gigch, 91] J. P. VAN GIGCH. *System design modeling and metamodeling*. Plenum Press, New York, 91.

[Velichkovsky, 92] B-M. VELICHKOVSKY. *Organisation fonctionnelle de l'intelligence humaine*. Revue Internationale de systémique, 1992, Vol. 6, N°3, p.241-262.

[Vercouter & al., 98] L.VERCOUTER, Ph. BEAUNE., & SAYETTAT C. *Apprentissage dans les SMA*. 6<sup>èmes</sup> journées francophones IAD & SMA, Pont-à-Mousson, 18-20 novembre 1998, France.

[Vicat, 93] C. VICAT, A. BUSAC, & J.G. GANASCIA. *Cerise : A CYCLIC APPROACH FOR KNOWLEDGE ACQUISITION*. Proceedings of 7<sup>th</sup> European Workshop, EKAW'93, Toulouse and Caylus, France, 1993, Berlin : Springer-Verlag, 1993, p. 237-255.

[Vincent, 95] L. VINCENT. *La simulation de flux : outil d'investigation de l'entreprise-système ?* Dans la modélisation systémique en entreprise, Coord. C. Braesch et A. Haurat, chapitre 8, 1995.

[Vincent & al., 98] L. VINCENT, B. BESOMBES, B. PALAMCA, F. BIENNIER. *Projet thématique Rhône Alpes*, rapport d'activité 1997-1998.

[Vion, 92] R. VION. *La communication Verbale, Analyse des Interactions*. Editions Hachette. 1992.

[Vogel 88] C. VOGEL. *Génie Cognitif*. Editions Masson Paris, 1988.

[Voisin, 85] W. VOISIN. *Les usines de demain*. Hermès, 1985.

[Von Bertalanffy, 76] L. Von BERTALANFFY. *Théorie générale des systèmes*. Paris : Dunod, 1976. 296 p.

[Watkins & al., 92] C.J. WATKINGS. P. DAYAN. *Q-learning*. In Machine Learning, vol. 8, pp. 279-292.

[Weiss, 93] G. WEISS. *Learning to Coordinate Actions in Multi-Agent Systems*. IJCAI-93. Chambéry, France, 93. P 311-316.

[Wess & al., 93] S. Wess., K. Althoff., & G. Derwand. *Using k-d trees to improve the retrieval step in case-based reasoning*. European Workshop on case-based Reasoning, Lecture Notes In Artificial Intelligence 837, Springer Verlag, Berlin 1993, p.167-181.

[Woltercroft, 89] J. WOLTERCROFT. *Restructuring, reminding and repair : what's missing from models of analogy*. A.I. Communications 2 (2), 58-71, 1989.

[Wooldridge & Jennings, 95] M.J. WOOLDRIDGE & N.R. JENNINGS. *Agents Theories, Architectures, and Languages : A survey*. Knowledge Engineering Review 10(2), June 1995.

[Xu, 87] Z. Xu. *Classification en fonction d'objet assertion et d'objet horde*. Rapport de DEA., Universit, Pierre et Marie Currie.

[Zarifian, 94] P. ZARIFIAN. *gestion par activités, gestion par processus, gestion par projets: quelles différences ? quels rapports ?*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Université Paris Val-de-Marne, février, 1994. 24 p. Article interne du Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés, PZ-22/04/94.

[Zarifian, 95] P. ZARIFIAN. *L'émergence de l'organisation par processus : à la recherche d'une difficile cohérence*. In. Cohérence, pertinence et évaluation, Paris : Ecosip Economica, 1995. p. 1-21.

## ANNEXES





## ANNEXE A

### DESCRIPTION DES SCENARIOS

Dans cette annexe, nous allons présenter les différents scénarios productiques dont un a été étudié en détail au chapitre VII. Ces scénarios sont regroupés suivant 3 action-types (rationalités structurelles propres au niveau stratégique) :

1. Action interdite sur le processus physique, et autonomie du processus administratif
2. Action interdite sur le processus administratif, et autonomie du processus physique.
3. Autonomie totale pour le processus physique et le processus administratif

Pour ces trois rationalités, nous avons établi 8 scénarios (fig. 1), qui seront détaillés dans cette annexe.

#### Modèle semi-générique

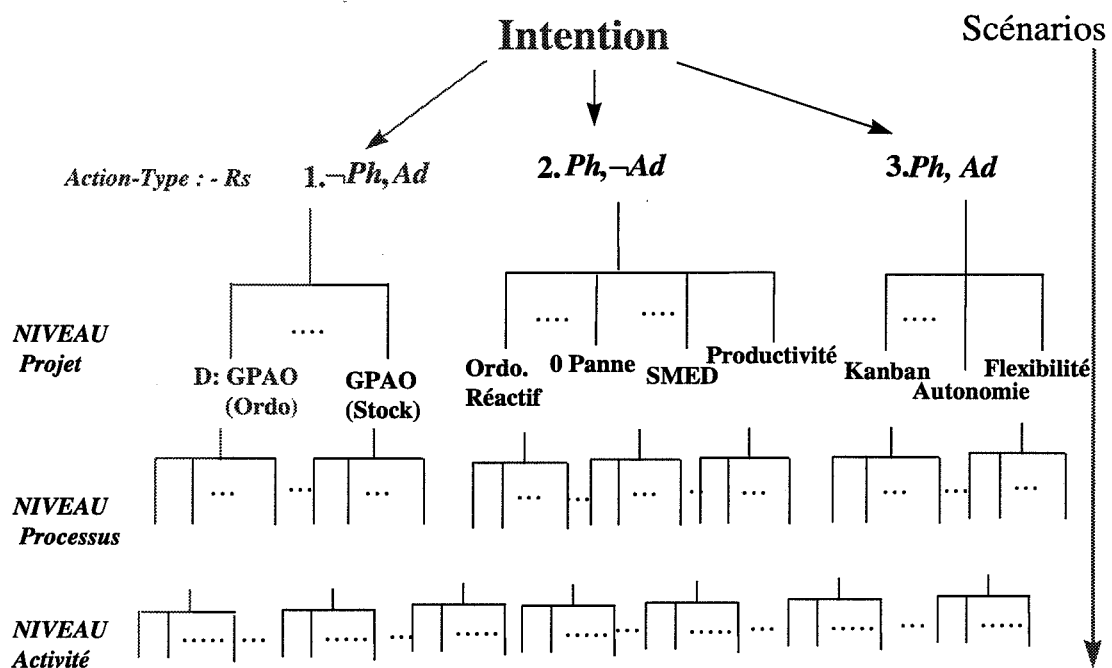


Figure 1 : Modèle d'une organisation à trois niveaux

## SCÉNARIOS

Dans les scénarios ci-dessous, il faut suivre les notations suivantes :  $AC_{j,k}^i$  ;

i : niveau de modélisation,

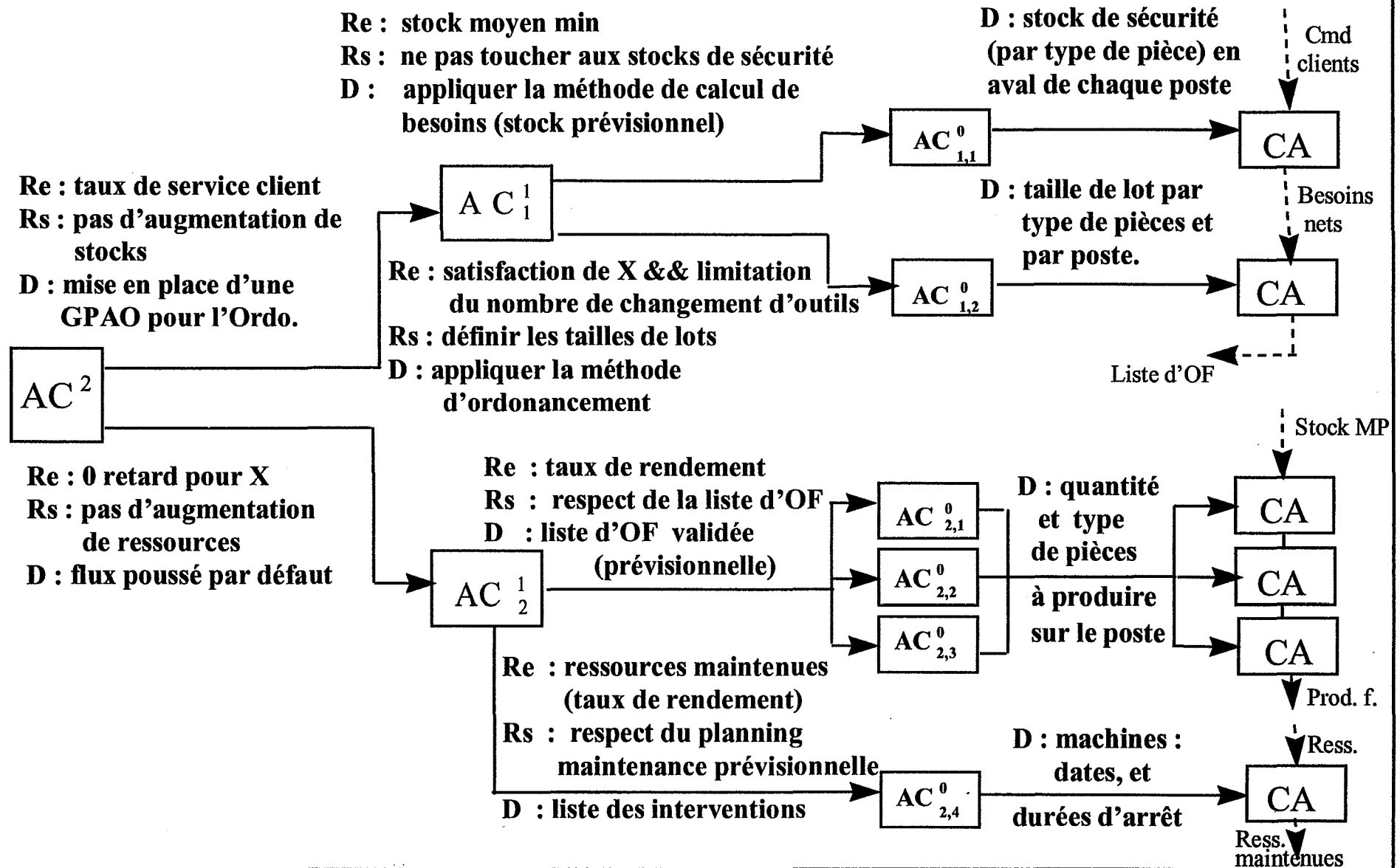
j : numéro du processus (administratif=1, physique=2),

k : numéro attribué à l'agent.

$AC^2$  est l'agent stratégique. Le processus opérationnel administratif est constitué de 3 agents :  $AC_1^1$  responsable administratif,  $AC_{1,1}^0$  : agent calcul des besoins et  $AC_{1,2}^0$  : agent ordonnancement. Le processus opérationnel physique est constitué de 4 agents :  $AC_2^1$  responsable de production et 3 opérateurs  $AC_{2,k}^0$  (k varie de 1 à 3). Le processus maintenance est constitué d'un agent  $AC_{2,4}^0$ .

**Action-Type 1 : Rs : Action interdite sur le processus physique**

**Scénario 1 : GPAO\_Ordo (Autonomie Administratif)**

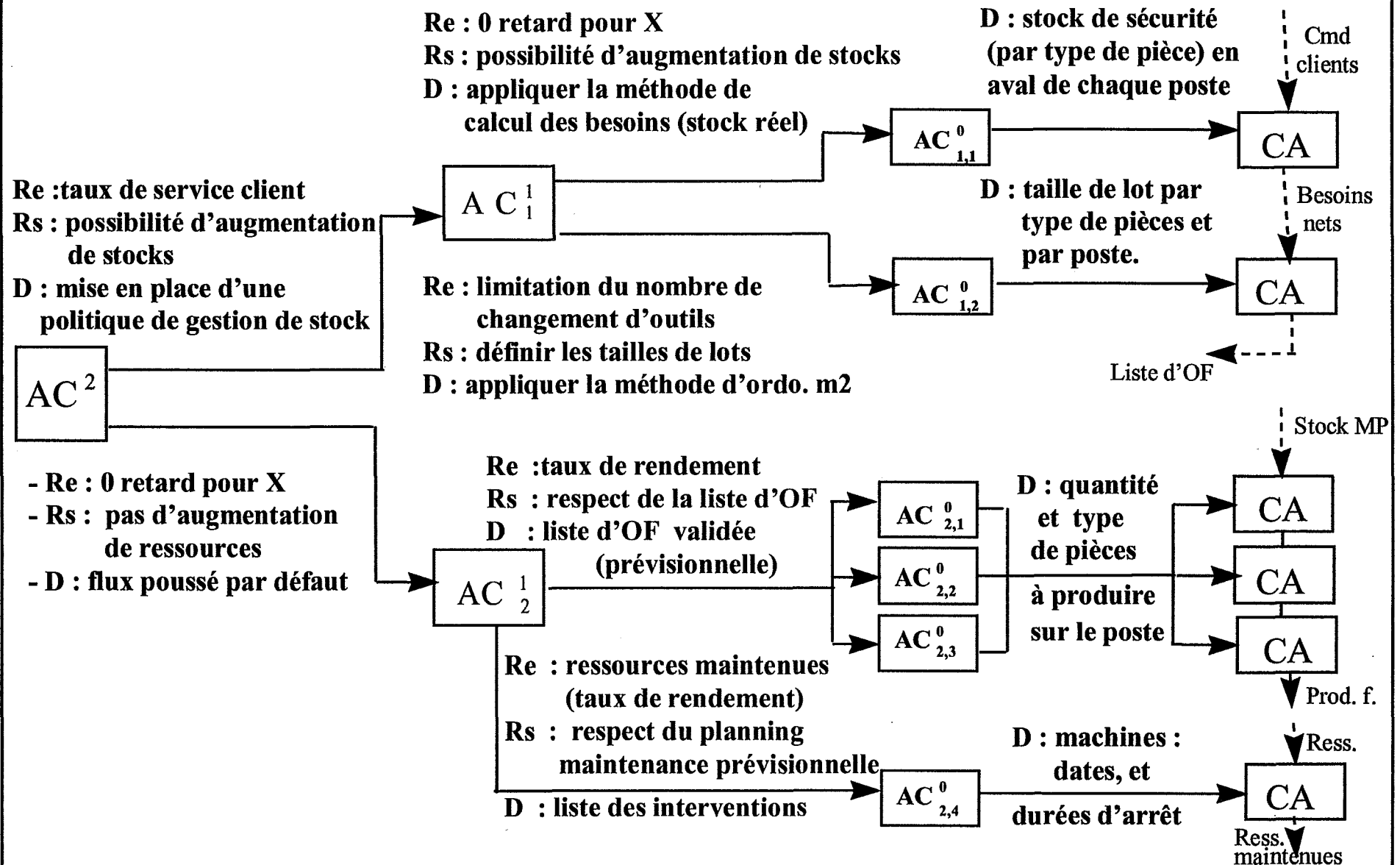






**Action-Type 1 : -Rs : Action interdite sur le processus physique**

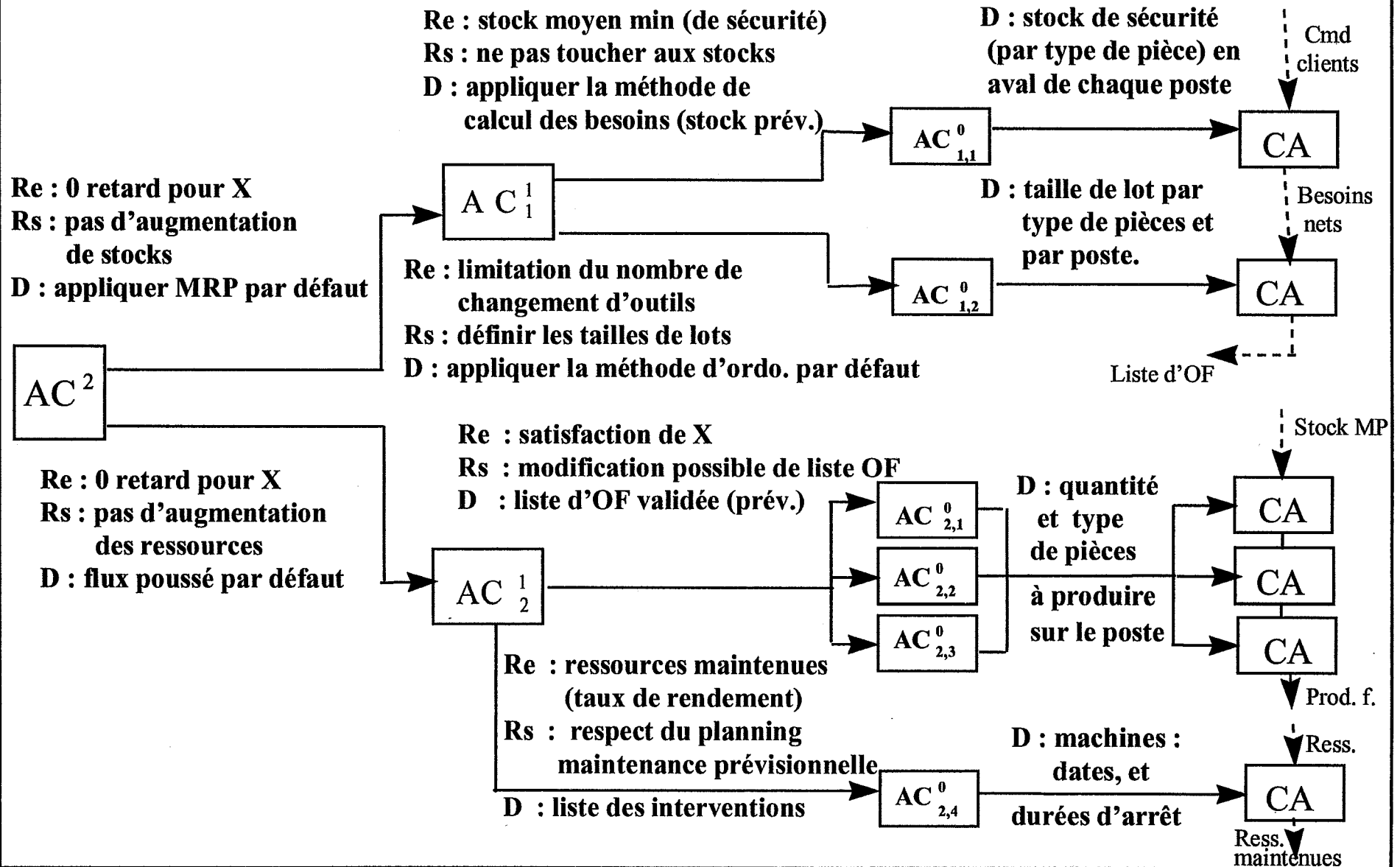
**Scénario 2 : GPAO\_Stock (Autonomie Administratif)**





**Action-Type 2 : Rs : Action interdite sur le processus administratif**

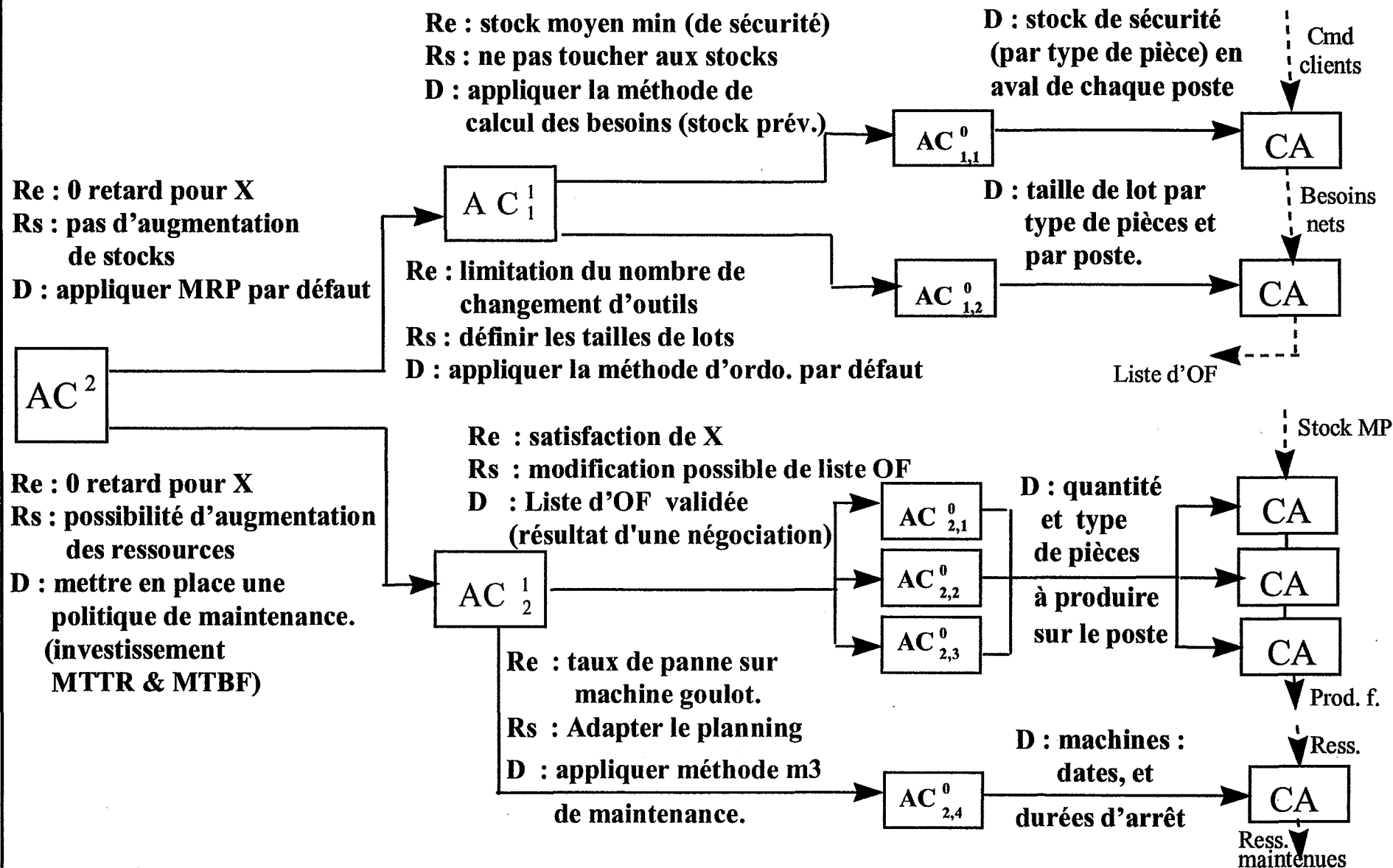
**Scénario 1 : ORDONNANCEMENT REACTIF (autonomie physique)**





**Action-Type 2 : Rs : Action interdite sur le processus administratif**

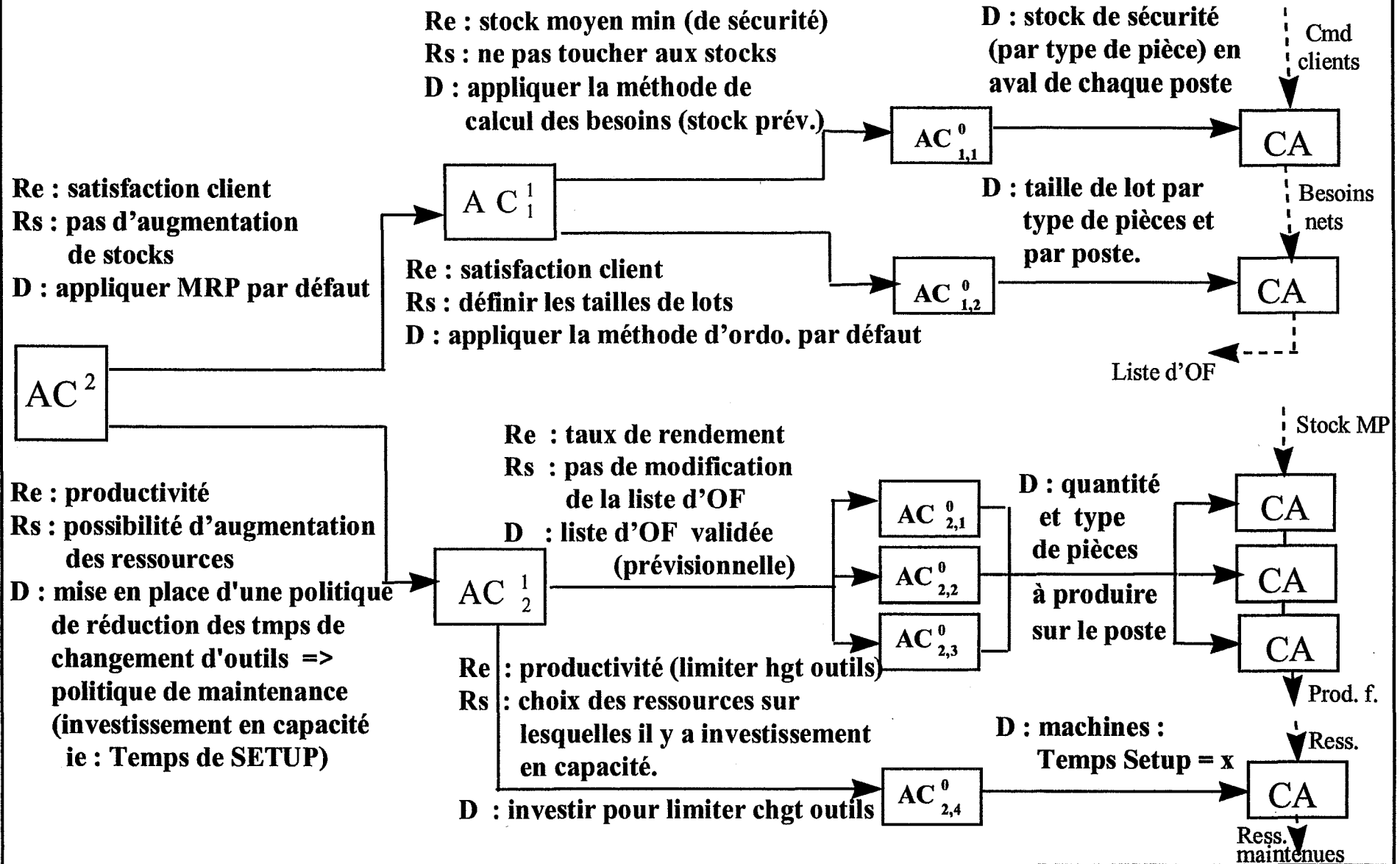
**Scénario 2 : 0 Panne.**





**Action-Type 2 :** Rs : Action interdite sur le processus administratif

**Scénario 3 : SMED**

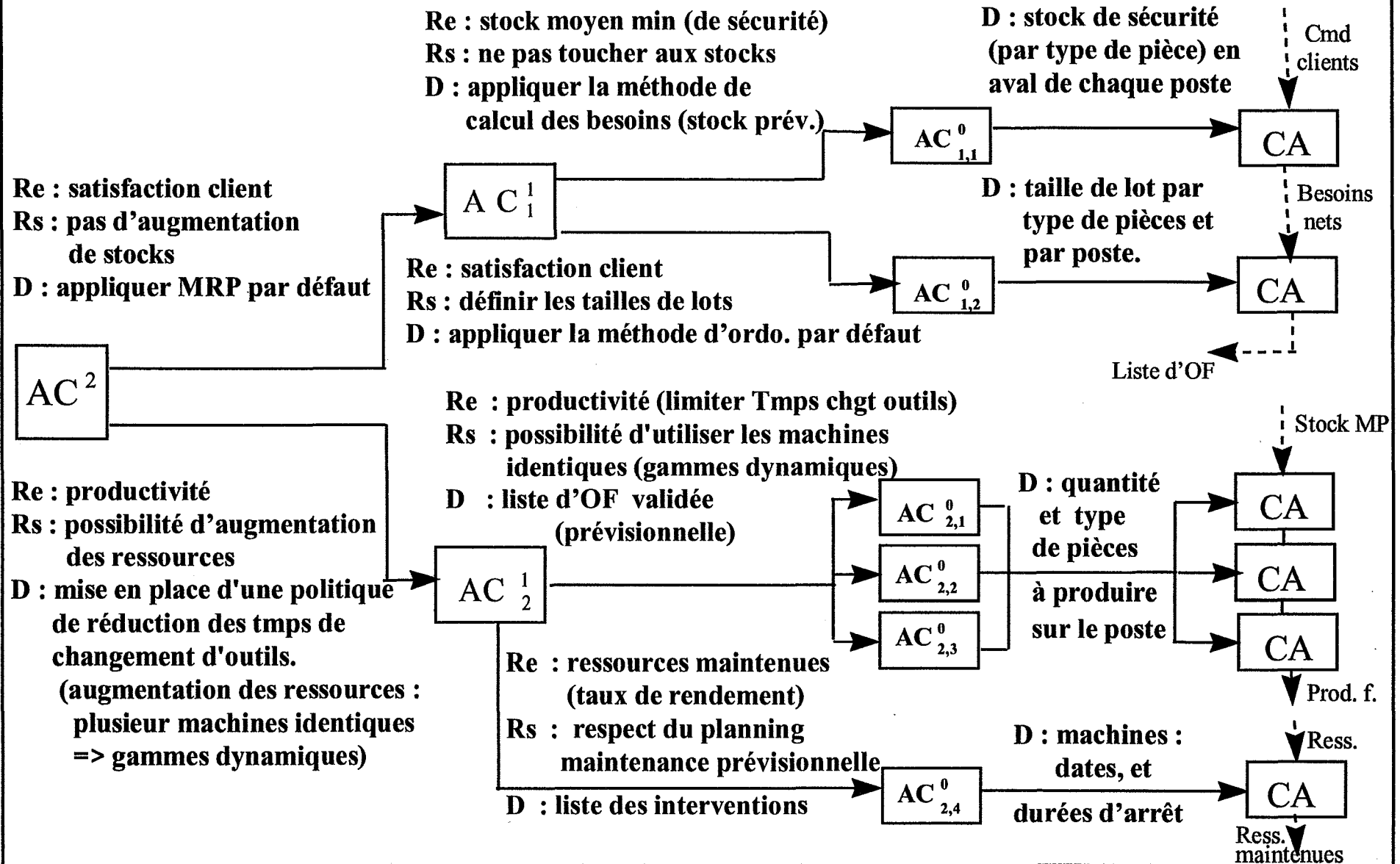






**Action-Type 2 : Rs : Action interdite sur le processus administratif**

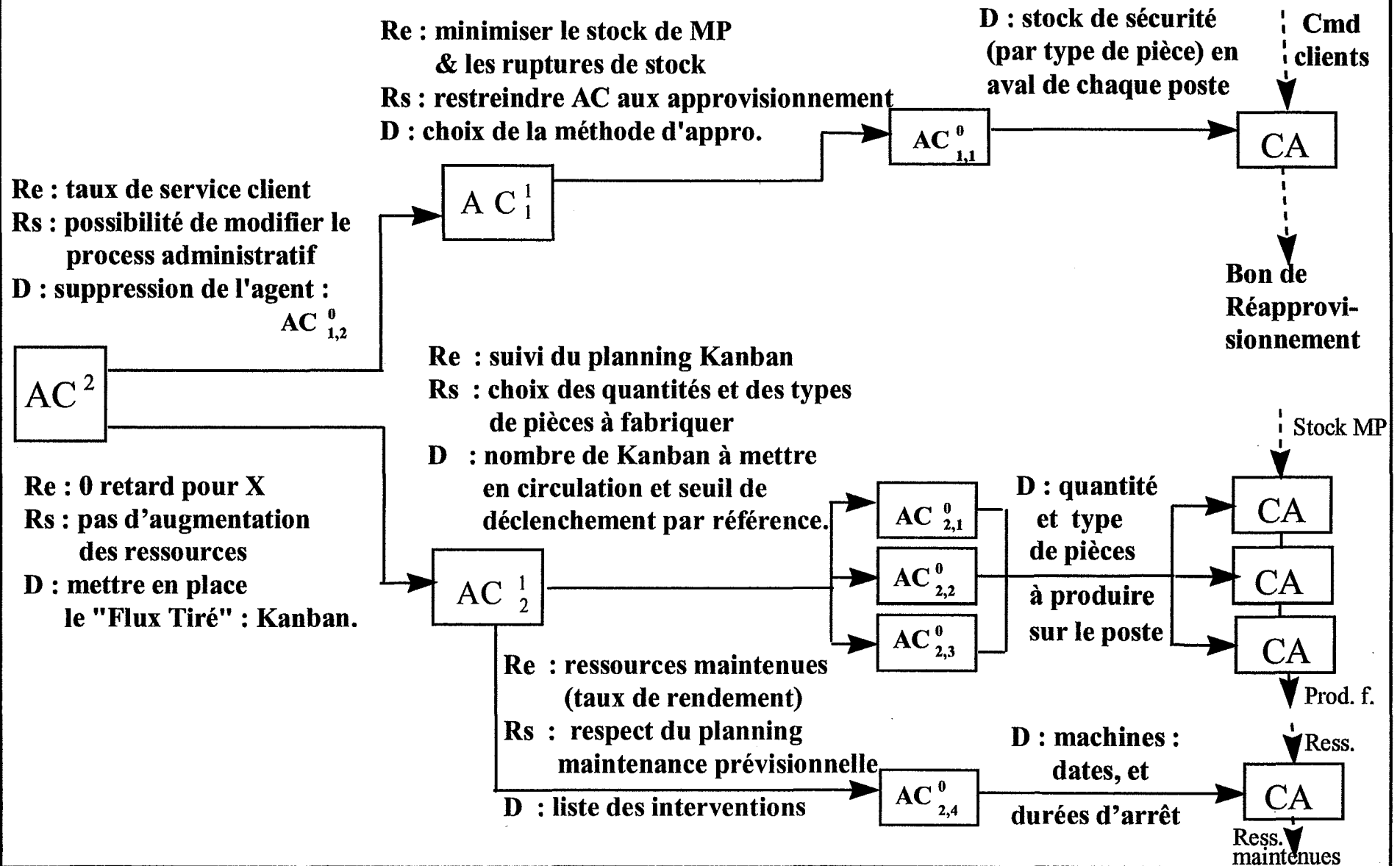
**Scénario 4 : Productivité (gammes dynamiques)**





**Action-Type 3 : Rs : Action autorisée sur les processus administratifs et physiques**

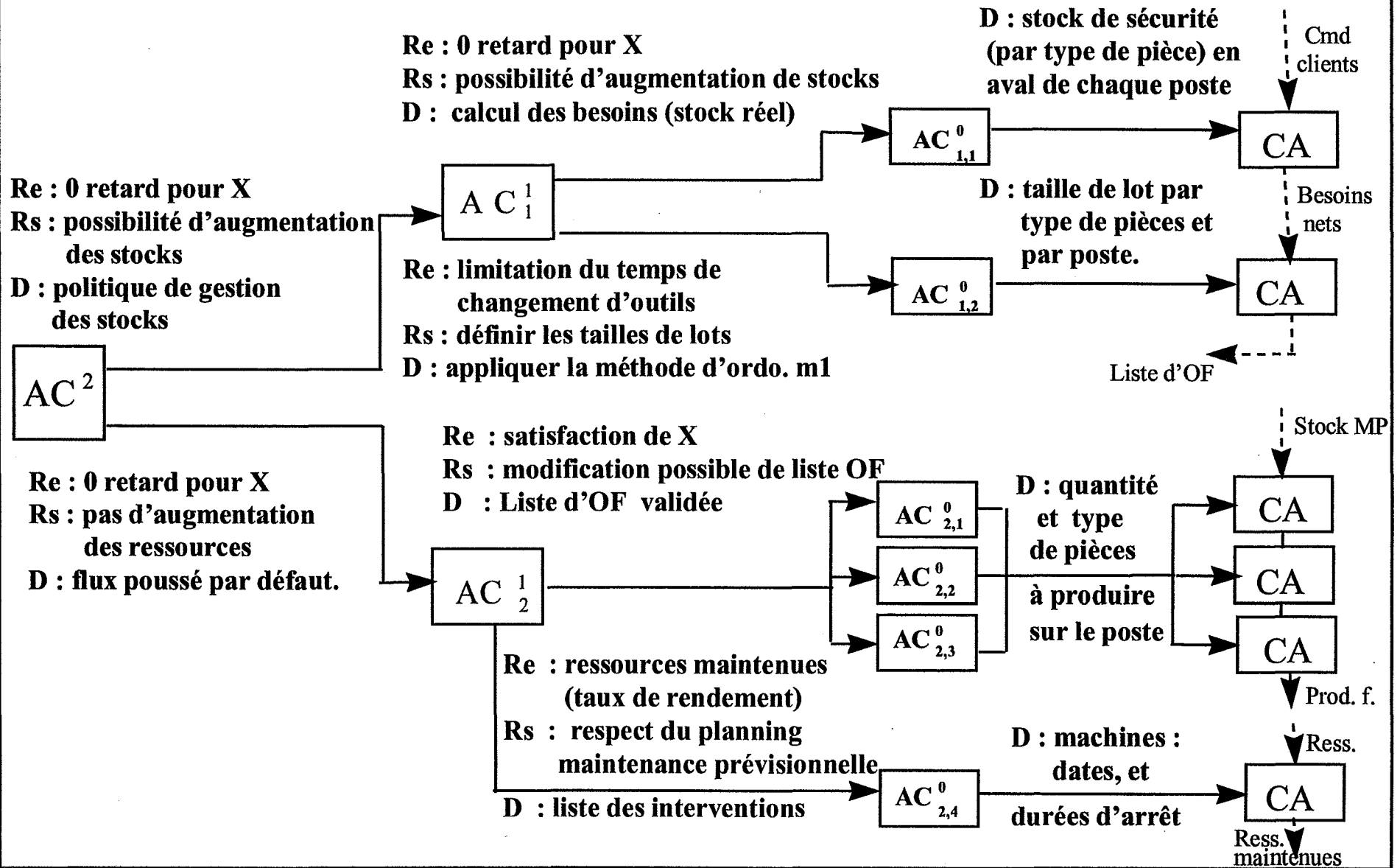
**Scénario 1 : Kanban**





**Action-Type 3 : Rs : Action autorisée sur les processus administratifs et physiques**

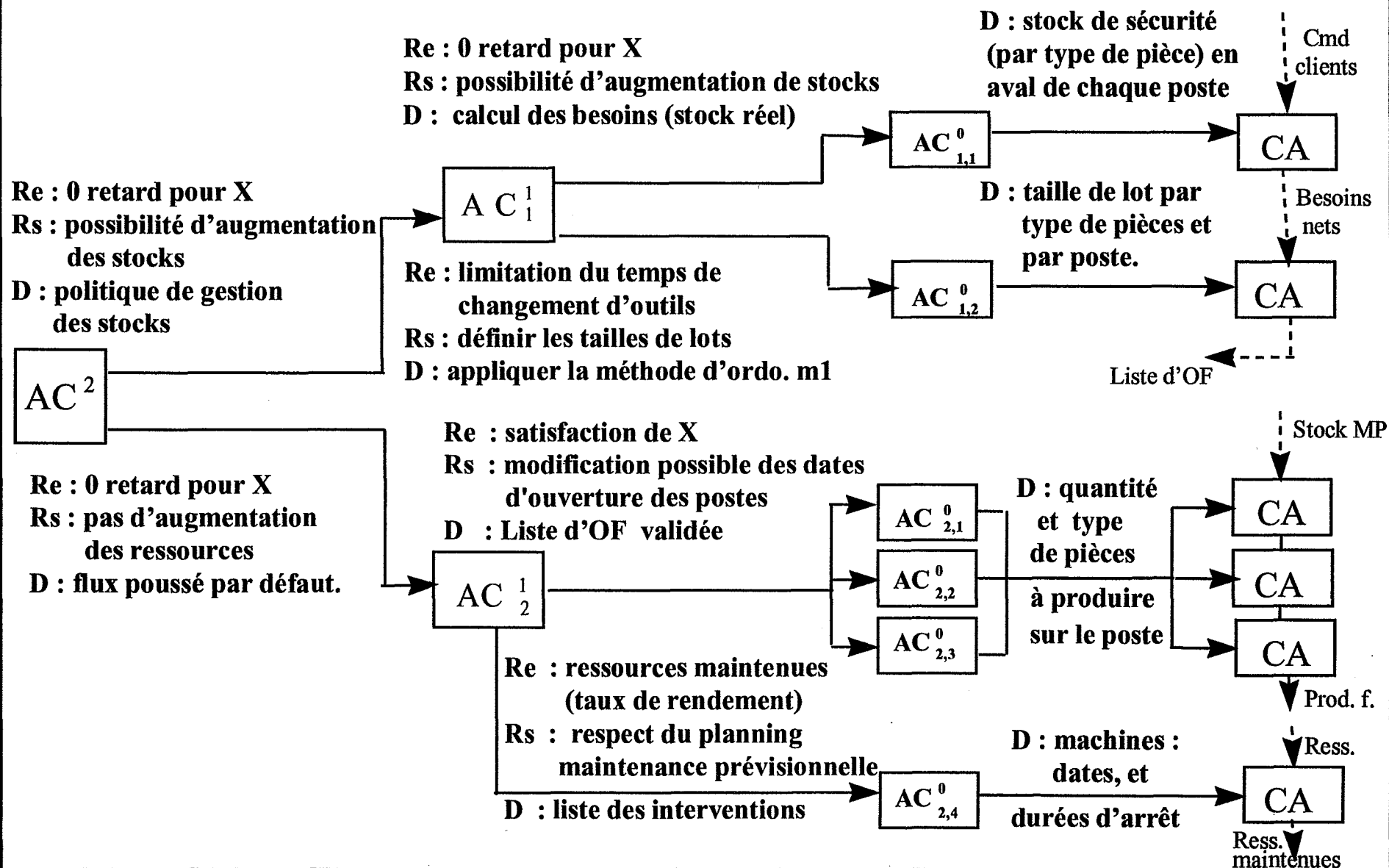
**Scénario 2 : Autonomie.**





**Action-Type 3 : Rs : Action autorisée sur les processus administratifs et physiques**

**Scénario 3 : Flexibilité.**







## ANNEXE B

### GLOSSAIRE

#### Accointances :

Chaque agent est lié directement à un ensemble d'autres agents qu'on appelle ses accointances [Ferber, 95].

#### Agent :

On appelle agent une entité physique ou virtuelle,

a . qui est capable d'agir dans un environnement,

b . qui peut communiquer directement avec d'autres agents,

c . qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),

d . qui possède des ressources propres,

e . qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,

f . qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),

g . qui possède des compétences et offre des services,

h . qui peut éventuellement se reproduire,

i . dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit [Ferber, 95].

Un agent est une entité intelligente, agissant rationnellement et intentionnellement, en fonction de ses buts propres et de l'état actuel de ses connaissances [Demazeau et al . 90].

Un agent est toute entité active dont le comportement est utilement décrit à l'aide de notions mentales telles que les connaissances, les buts, les intentions, ...[Lespérance, 95].

#### Agent adaptatif :

Un agent adaptatif est un agent d'un haut niveau de flexibilité, capable de contrôler ses aptitudes (de communication, comportementales, etc.) selon l'agent avec lequel il interagit [Labidi et al . 93].

#### Agent cognitif :

Un agent cognitif est un agent qui dispose d'une base de connaissances comprenant l'ensemble des informations et des savoir-faire nécessaires à la réalisation de sa tâche et à la gestion des interactions avec les autres agents et avec son environnement [Ferber, 95].

#### Agent Intelligent :

On appelle agent intelligent un agent cognitif, rationnel, intentionnel et adaptatif [Labidi et al . 93].

#### Agent intentionnel :

Un agent intentionnel est un agent guidé par ses buts [Labidi et al . 93]. Il possède des buts et des plans explicites lui permettant d'accomplir ces buts [Ferber, 95].

#### Agent rationnel :

Un agent rationnel est un agent qui suit le principe de rationalité suivant : “ Si un agent sait qu’une de ses actions lui permet d’atteindre un de ses buts, il la sélectionnera ” [Newell, 82]. Un tel agent est capable de justifier sa décision [Labidi et al . 93].

Un agent rationnel est un agent dont les actions sont toujours le fruit d’une délibération raisonnée et qui servent directement à la satisfaction des buts de l’agent [Ferber, 95].

**Agent réactif :**

Les agents réactifs sont des agents qui ne disposent que d’un protocole et d’un langage de communication réduits, leurs capacités répondent uniquement à la loi stimulus/action [Labidi et al . 93].

**Apprentissage :**

Les agents doivent être capables de mettre à jour leurs connaissances sur les autres, et/ou leurs connaissances sur la résolution des problèmes en tenant compte des critiques sur les connaissances antérieures, les échecs, les nouveaux exemples. Il doivent donc pouvoir apprendre, l’acquisition des connaissances pouvant s’effectuer par communication ou par perception [Moraitis, 94].

**Cognition :**

C’est la capacité d’une entité de distinguer un soi du non-soi. Autrement dit :

La cognition désigne la propriété qui permet d’établir une relation au monde dans lequel notre “ soi ” se distingue de quelque chose de perçu comme un ‘non-soi’ [Dausset, 90].

La cognition désigne la propriété d’une entité propre au milieu d’événements récurrents ou différents, susceptibles de mettre à mal la dite identité. Cette définition est d’origine biologique : le niveau le plus bas étant, par exemple, notre système immunitaire. La frontière entre un ‘soi’ et un ‘non-soi’ peut être repérée à des niveaux d’organisation plus élevés, tels que le corps, voire même une organisation économique [Micaelli, 94].

**Cogniton :**

Un cogniton est une entité cognitive élémentaire qui est reliée à d’autres cognitons pour former une configuration mentale dynamique qui évolue avec le temps.

NB : Ce terme est construit à partir du vocable ‘cognitif’ et de la terminaison ‘on’ qui désigne quelque chose d’insécable, une particule élémentaire, à la manière de photon ou méson. Il a été élaboré par analogie avec ‘infon’ l’unité élémentaire d’information développée par K. Devlin, 91 dans le cadre de la sémantique situationnelle [Ferber, 95], [Devlin, 91].

**Communication :**

La communication désigne l’ensemble des processus physiques et psychologiques par lesquels s’effectue l’opération de mise en relation d’un agent (l’émetteur) avec un ou plusieurs agents (les récepteurs), dans l’intention d’atteindre certains objectifs. La communication est caractérisée par l’échange d’information entre deux agents. Les processus physiques désignent les mécanismes d’exécution des actions (ex. l’envoi et la réception de messages), les processus psychologiques se rapportent aux transformations opérées par les communications sur les buts et les croyances des agents [Anzieu et al. 68] [Bouron, 92].

**Compétence :**

La compétence est une connaissance utile (par exemple) à l’entreprise en vue d’atteindre des résultats. Il s’agit d’une aptitude à savoir, à être et à faire. Elle s’exerce sur un domaine.

Il peut exister plusieurs formes de compétences :

1. La compétence professionnelle : connaissance approfondie de certaines méthodes et techniques.
2. La compétence spécialisée : connaissances approfondies dans un domaine technique précis.
3. La compétence experte : maîtrise complète de concepts et pratiques dans un domaine hautement spécialisé [Bruneau et al. 92].

### Connaissance :

La connaissance (en IA) est définie comme l'ensemble des informations (savoir, savoir-faire, expérience, souvenir, concepts, faits....) nécessaire à un être humain (ou à une machine) organisées de manière à ce qu'il puisse accomplir une tâche considérée comme complexe.

NB : La connaissance d'un agent ne se limite pas à celle des tâches qu'il accomplit : il faut aussi inclure les informations concernant le monde qui l'entoure, c'est-à-dire son environnement et les autres agents avec lesquels il communique et interagit [Ferber, 95].

La connaissance dans l'interaction est le fruit d'interaction entre agents cognitifs qui, par un processus de confrontation, d'objections, de preuves et de réfutations, élaborent des concepts, construisent des théories et formulent des lois [Lakatos, 76].

Les connaissances sont les faits qui ne servent pas à décrire la situation et qui n'ont pas été établis par le système pour donner des propriétés de cette situation; les connaissances servent à élaborer des faits nouveaux ou à déterminer les actions qu'il faut entreprendre. Une caractéristique de la connaissance est sa permanence pour une variété de problèmes.

NB : Ceci est particulièrement délicat, quand il y a apprentissage, des faits établis par le système deviennent des connaissances...[Pitrat, 90].

La connaissance selon un sens premier : la connaissance désigne le rapport général d'un sujet à un objet. Cette connaissance diffuse imprègne totalement le sujet au point d'être difficilement communicable; c'est ce qui rend nécessaire l'introduction d'un second sens selon lequel : la connaissance désigne le rapport d'un sujet à un objet en tant qu'il est objectivable, c'est-à-dire en tant qu'il est transmissible par le langage....[Ganascia, 91].

Ensemble des procédures et des structures qui permettent à un acteur d'utiliser son savoir pour modifier son rapport au monde [Micaelli, 94].

### Connaissance collective :

C'est l'ensemble des savoirs théoriques, savoir-être et savoir-faire qui permettent par exemple à l'entreprise de faire face aux exigences de son environnement et forment la connaissance de l'entreprise. La connaissance collective est plus que la simple addition des connaissances individuelles. Elle représente en effet un ensemble coordonné de savoirs, pratiques et comportements tendant à la fois à obtenir des parts de marché pour l'entreprise et à lui permettre d'assurer son identité propre. Tout comme un individu, la connaissance d'une entreprise, et plus généralement d'un système, comprend trois éléments :

- Le savoir théorique collectif : type d'informations disponibles et recherchées, jargon technique....
- le savoir-faire collectif : ensemble des métiers de l'entreprise, des méthodes de travail....
- le savoir-être collectif : identité de l'entreprise (logo, objectifs, projets, valeurs, histoire), rituels des réunions...[Bruneau et al, 92].

### Connaissance générale :

Les connaissances générales correspondent à des connaissances de bon-sens. L'expert ne les applique pas directement pour exécuter des tâches habituelles, mais dans des situations, nouvelles ou exceptionnelles, qu'il ne sait pas traiter a priori. Leur généralité rend ces connaissances versatiles mais elles sont lourdes de maniement car non finalisées [Hoc, 87], [Falzon, 88], [Aussenac, 89].

### Connaissance routinière :

Les connaissances routinières, très familières pour le sujet, sont des automatismes de traitement, mis en oeuvre sans un contrôle conscient de sa part. Ces connaissances ne sont générées qu'après la répétition d'une série de situations correspondant à des conditions extrêmement proches. L'automatisation se traduit par une sorte de compilation des procédures de résolution, c'est-à-dire un affinage par élimination des informations non directement pertinentes dans ces procédures [Hoc, 87] [Falzon, 88], [Aussenac, 89].

**Connaissance opérationnelle :**

Les connaissances opérationnelles, au contraire, sont finalisées et spécifiques d'un domaine ou d'une tâche. Leur acquisition découle de la pratique répétée d'une tâche, qui proviennent d'une série d'expériences analogues dans un environnement imparfaitement stable[Hoc, 87] [Falzon, 88] [Aussenac, 89].

**Coopération :**

On dira que plusieurs agents coopèrent, ou encore qu'ils sont dans une situation de coopération, si l'une des deux conditions est vérifiée :

1. L'ajout d'un nouvel agent permet d'accroître différenciellement les performances du groupe.
2. L'action des agents sert à éviter ou à résoudre des conflits potentiels ou actuels[Ferber, 95].

**Coordination :**

La coordination est définie comme l'acte de gérer les inter-dépendances des différentes activités exécutées pendant la réalisation d'un but. Les inter-dépendances regroupent les prérequis (résultat d'une activité est nécessaire à une autre activité), le partage des ressources et la simultanéité (il existe une synchronisation entre l'exécution des activités). Suivant cette définition, la coordination recouvre les indices de coopération se rapportant au partage des ressources, à la coordination des actions et à la parallélisation des actions[Malone et al . 90].

La coordination définit les interactions entre un ensemble d'agents qui accomplissent des activités collectives[Bond et Gasser, 88].

Malone donne une définition similaire en considérant une structure de coordination comme un modèle de prise de décision et de communication entre un ensemble d'acteurs qui accomplissent des tâches afin de réaliser des objectifs [Malone, 88b].

Durfee et Montgomery considèrent que le but de la coordination est de trouver, parmi un ensemble de comportements d'agents qui interagissent, une collection de comportements qui réalisent d'une façon satisfaisante les objectifs les plus importants des agents[Durfee et Montgomery, 91].

**Coordination d'actions :**

La coordination d'actions est comme l'ensemble des activités supplémentaires qu'il est nécessaire d'accomplir dans un environnement multi-agents et qu'un seul agent poursuivant les mêmes buts n'accomplirait pas [Malone, 88].

La coordination des actions, dans le cadre de la coopération, peut donc être définie comme l'articulation des actions individuelles accomplies par chacun des agents de manière à ce que l'ensemble aboutisse à un tout cohérent et performant [Ferber, 95].

**Croyance :**

Les croyances décrivent l'état du monde du point de vue d'un agent, et donc la manière dont il se représente son environnement, les autres agents ainsi que lui-même. En particulier il faut bien distinguer les croyances sur soi des croyances sur les autres, les premières pouvant être cohérentes avec l'état dans lequel se trouve l'agent, alors que les secondes ne sont que partielles et éventuellement erronées [Ferber, 95].

**Décision :**

Choix arrêté qui rend effectif une action [Micaelli, 94].

Décider, c'est identifier et résoudre les problèmes que rencontre toute organisation [Le Moigne, 74].

**Décision stratégique :**

Concerne la politique générale de l'entreprise à long terme [Ansoff, 89].

Ce sont des décisions qui portent par exemple sur le choix des produits que l'entreprise fera et des marchés où elle vendra. [Anthony, 65], [Burlat, 96].

Les décisions prises aux niveaux stratégique et tactique sont considérées comme des décisions de contrôle appelées méta-décisions “ qui fait quoi , selon quels critères ”[Mintzberg et al . 76].

**Décision tactique ( administrative ) :**

Elles servent à la gestion des ressources en vue d’obtenir les meilleurs résultats possibles [Anthony, 65], [Burlat, 96].

....toutes les décisions visant à obtenir et à utiliser efficacement les ressources disponibles pour atteindre effectivement “ des objectifs assignés ”[Anthony, 65].

**Décision opérationnelle :**

C’est une décision qui assure la flexibilité quotidienne nécessaire pour faire face à la demande, dans le respect des décisions tactiques [Ansoff, 89].

Les décisions opérationnelles ont pour but d’obtenir de l’exploitation courante le maximum de profit[Anthony, 65] [Burlat, 96].

Les décisions opérationnelles sont des décisions par lesquelles on mène effectivement et efficacement à bien des tâches spécifiquement prédéfinies [Le Moigne, 74].

**Décision réflexe :**

Les décisions réflexes sont émises par le système infèrent lorsqu’il reconnaît une situation déjà répertoriée, composée d’intentions habituelles, d’informations répétitives, et de rationalités stables et connues [Burlat, 96].

**Décision structurée :**

Les décisions structurées correspondent au cas où, bien que l’information ne soit pas complète, le décideur sait qu’il peut faire appel à un certain nombre d’algorithmes, de structures de raisonnement, qui seront susceptibles de l’aider grandement à avancer dans la phase de résolution [Le Moigne, 74] [Burlat, 96].

**Décision non-structurée :**

La décision non-structurée ou faiblement structurée pour laquelle la multiplicité des critères à prendre en compte peut décourager la formalisation. Cette décision peut à l’extrême limite devenir irrationnelle ou injustifiable [Le Moigne, 74], [Burlat, 96].

**Emergence :**

C’est l’apparition d’un organe nouveau ou de propriétés nouvelles d’ordre supérieur[Le petit Robert].

**Engagement :**

Les engagements caractérisent les dépendances (devoirs, contraintes...) qui lient les agents cognitifs par rapport à eux-mêmes, mais surtout par rapport aux autres lorsqu’ils décident d’accomplir une action, de rendre un service et, d’une manière générale, lorsqu’ils ont l’intention de faire quelque chose [Ferber, 95].

**Expertise :**

L’expertise est une connaissance qui relève de la spécialisation (connaissance approfondie dans un domaine particulier). Elle s’appuie sur une longue expérience reconnue. Sa finalité est de résoudre des problèmes pointus et non standards [Bruneau et al . 92].

Aptitude à résoudre un problème complexe en temps fini, de façon viable, sur la base d’une expérience donnée [Micaelli, 94].

**Indicateur de performance :**

Les indicateurs de performance constituent une solution possible pour évaluer l’entreprise à partir de la recherche d’objectifs quantifiables.

Un indicateur de performance c’est :

- une donnée exprimée en quantité et non en valeur,

- qui mesure l'efficacité,
- de tout ou partie d'un processus ou d'un système,
- par rapport à une norme, un plan ou un objectif,
- qui aura été déterminé et accepté [Bonnefous, ][Pole info, 93],

Les indicateurs de performance ne doivent pas constituer une mosaïque de logiques locales, mais un système collectif de logiques partielles traduisant une stratégie globale [Lorino].

**Indicateur de processus :**

Exemple : La quantité produite [Bonnefous, ][Pole info, 93].

Les entreprises occidentales ont toujours privilégié les indicateurs de résultats, les entreprises japonaises, ceux de processus. Les occidentaux comptent les oeufs de la poule, les japonais s'intéressent à la santé de celle-ci.[Greif .M].

**Indicateur de résultat :**

Exemple : la façon dont la quantité a été produite : nombre d'incidents, rebuts, etc...[Bonnefous, ] [Pole info, 93].

**Information :**

Une information est un fait nouveau, un renseignement ou une connaissance résultant d'une observation [(de) Rosnay, 75].

Une information pour une personne (ou un automate) tout signal, tout message, toute perception qui produit un effet sur son comportement ou sur son état cognitif [Mélèse, 79].

Une information constitue une représentation à un instant donné de notre environnement [Nicolet et al . 84].

Une information est un renseignement, élément de connaissance; elle est l'unité élémentaire de connaissance, elle sert à la constitution de la connaissance [Bruneau et al . 92].

Code émis, transmis et reçu, grâce à un support invariant, au sein d'un système donné [Micaelli, 94].

Une information est un cogniton qui représente une croyance véhiculée par un autre agent et transmise par message [Ferber, 95].

**Ingénierie de la connaissance :**

Discipline dont l'intérêt est de concevoir des artefacts susceptibles de codifier, de mémoriser, ou de communiquer la connaissance[Micaelli, 94].

**Intention (du point de vue de l'IAD) :**

Une intention est la déclaration explicite des buts et des moyens d'y parvenir. Elle exprime donc la volonté de l'agent d'atteindre un but ou d'effectuer une action [Searle, 83] [Searle, 90].

Les intentions décrivent ce qui meut un agent, ce qui lui permet de passer à l'acte [Ferber, 95] .

**Interaction :**

Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques [Ferber, 95].

On appelle situation d'interaction un ensemble de comportements résultant du regroupement d'agents qui doivent agir pour satisfaire leurs objectifs en tenant compte des contraintes provenant des ressources plus ou moins limitées dont ils disposent et de leurs compétences individuelles[Ferber, 95].

**Intuition :**

L'intuition est une synthèse du savoir acquis qui se déclenche inconsciemment quand un problème se pose, c'est une action réflexe face à un événement. L'intuition paraît être une composante du savoir-faire [Bruneau et al . 92].

Un absolu ne saurait être donné que dans une intuition, tandis que tout le reste relève de l'analyse [Bergson, 48].

**Métarationalité :**

Propriété d'une action ou d'une structure à améliorer son jugement sur ce qu'elle réalise et comment elle le réalise [Micaelli, 94].

**Modèle :**

Entité permettant une connaissance ou un contrôle de la réalité. Il est le produit d'une théorie. [Micaelli, 94].

**Modèle productique :**

Représentation fonctionnelle du système de fabrication utile à sa rationalisation [Micaelli, 94].

**Modélisation :**

Façon de rendre intelligible une réalité en ayant recours à des éléments contenus en elle (modèle contingent), hors de celle-ci (modèle formel) ou abstraite de celle-ci (modèle abstrait) [Micaelli, 94].

**Modéliser :**

Modéliser c'est à la fois identifier et formuler quelques problèmes en construisant des énoncés, et chercher à résoudre ces problèmes en raisonnant par simulations. En faisant fonctionner le modèle-énoncé, on tente de produire des modèles solutions. Modélisation et simulation, réflexion et raisonnements, sont les deux faces inséparables de toute délibération [Le Moigne, 90].

**Motivation :**

La motivation est propre à chacun. C'est un agglomérat de plusieurs types de désirs : vouloir se perfectionner, donner un sens à son métier, éveiller sa curiosité, travailler sur soi-même, chercher à apprendre. Elle se relève peut-être de la volonté de se construire soi-même et de s'accomplir [Bruneau et al . 92].

**Négociation :**

La négociation désigne une stratégie de résolution qui utilise le dialogue pour parvenir à un accord visant à résoudre des conflits de croyances ou de buts. Les conflits de croyances sont produits par l'existence de contradictions entre les croyances des différents agents. Ils sont dus au fait que les agents possèdent des connaissances incomplètes voir erronées [Bouron, 92].

**Organisation :**

L'organisation désigne un ensemble d'agents travaillant ensemble au cours de la résolution d'une ou de plusieurs tâches. Le concept d'organisation peut être exprimé à partir des concepts plus élémentaires d'agent et de tâche. Par rapport au concept de tâche, l'organisation désigne les processus qui permettent : la décomposition des tâches en sous-tâches, l'allocation des tâches aux agents et l'accomplissement des tâches dépendantes de façon cohérente. Par rapport au concept d'agent, l'organisation détermine les statuts et les comportements sociaux d'agents (les rôles) et les relations qui permettent d'unir les agents au sein d'un groupe, que ce soit vis à vis de la décision (les liens d'autorité) ou vis à vis de la coordination (les liens d'engagement) [Bouron, 92].

La structure d'une organisation peut être simplement définie comme la somme totale des moyens employés pour diviser le travail en tâches distinctes et pour ensuite assurer la coordination nécessaire entre ces tâches [Mintzberg, 79].

**Raisonnement :**

Les différents types de raisonnement qui peuvent être utilisés par l'expert afin de traiter une tâche sont [Benchimol, 86] :

- Inductif : à partir de faits, dégager des caractéristiques générales;
- déductif : à partir de propriétés générales, identifier des propriétés plus particulières;
- itératif : répétition d'une même partie de raisonnement pour faire évoluer un fait vers un but;



- récuratif : dégager une propriété générale d'une propriété dont on a montré de proche en proche qu'elle est vraie pour un ensemble de faits;
- par l'absurde : montrer que la négation d'une conclusion est fausse;
- par spécialisation : restriction des propriétés générales à un contexte particulier;
- par analogie : association de faits ou événements de caractéristiques communes ou très voisines;
- élimination ou réduction des différences.....;

Dans les systèmes experts, on distingue avant tout les raisonnements progressifs et régressifs, qui conduisent à deux mécanismes d'inférence dans les moteurs : à partir des données (dit ' *chaînage avant* ') ou à partir des buts ( dit ' *chaînage arrière* ') [Laurière, 82] [Farreny, 85].

**Rationalisation :**

Sens général : Procédure idéale-typique par laquelle sont évaluées et modifiées, sur une période donnée, les actions en vue d'une efficacité (efficacité est la capacité à produire un effet plus pertinent) accrue. [Micaelli, 94].

**Rationalité :**

Propriété d'une action ou d'une structure à rendre adéquats des moyens à des objectifs (rationalité instrumentale ou rationalité en moyens ou rationalité praxéologique ou rationalité technique) ou à assurer la cohérence entre des fins (rationalité axiologique), de façon à priori (rationalité substantive) ou à mesure de son déroulement ou de son histoire ( rationalité procédurale). Une action rationnelle est finalisée, évaluable, et justifiable [Micaelli, 94].

**Rationalité évaluative :**

C'est une rationalité qui se réfère aux objectifs apparemment visés par les décideurs, ainsi qu'aux critères d'évaluation des résultats [Van Gigch, 91].

**Rationalités du niveau propre :**

Les rationalités substantive et procédurale sont en général issues du niveau propre [Van Gigch, 91].

**Rationalité structurelle :**

Qui oriente la constitution de la structure de prise de décision. Elle se réfère à la question de savoir quel type de décision doit être prise, comment, quand et par qui [Van Gigch, 91].

**Rationalité procédurale :**

Qui renvoie au problème du choix des procédures de prise de décision [Van Gigch, 91].

**Rationalité substantive :**

Qui est constituée à partir d'un ensemble de connaissances appartenant à un paradigme. Cette rationalité renvoie à la substance du savoir et permet de guider les actions [Van Gigch, 91].

**Réactivité :**

Délai nécessaire pour répondre à un besoin [Micaelli, 94].

**Requête :**

Les requêtes sont des actions effectuées par un agent afin qu'un autre agent accomplisse une action (faire quelque chose, répondre à une question, ....) [Ferber, 95].

**Savoir :**

Le savoir est autre chose qu'un simple stock d'informations. Il se compose certes d'informations, mais triées, mises en forme, interprétées de façon à en obtenir une représentation. Le savoir se compose d'idées, de concepts, d'images plus ou moins systématisés.

Le savoir est un processus; il évolue constamment dans le temps [Bruneau et al . 92].

Informations stockées, accessibles, transmises et susceptibles de donner une certification à son détenteur [Micaelli, 94].

**Savoir-faire :**

Savoir-faire est un ensemble d'informations permettant de rendre opérationnels des savoirs [Bruneau et al . 92].

**Savoir théorique :**

Savoir théorique est un ensemble d'informations générales, pas forcément opérationnelles [Bruneau et al . 92].

**Savoir-être :**

Le savoir-être est un ensemble d'informations comportementales(exemple : la patience) [Bruneau et al . 92].

**Système multi-agents :**

On appelle système multi-agent (SMA), un système composé des éléments suivants :

- 1 . Un environnement E, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
- 2 . Un ensemble d'objet O. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- 3 . Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers ( $A \subseteq O$ ), lesquels représentent les entités actives du système.
- 4 . Un ensemble de relations R qui unissent des objets ( et donc des agents ) entre eux.
- 5 . Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O.
- 6 . Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers [Ferber, 95].

**Systémique :**

Doctrine de modélisation. Opposée à la doctrine analytique. La systémique peut se définir comme une méthodologie de modélisation. Elle propose un certain nombre de postulats relatifs à la réalité, aux capacités épistémiques du modélisateur et à l'efficacité des modèles, qui doivent être admis pour qu'un modèle ou qu'une démarche de modélisation soient jugés satisfaisants [Micaelli, 94].

**Tableau noir :**

Le modèle de tableau noir (blackboard) définit une architecture qui organise la résolution de problèmes par coopération de plusieurs modules, appelés *sources de connaissances*, autour d'une base de données partagée appelée *tableau noir*. Chaque source de connaissances vient lire ou écrire sur le tableau noir. D'une façon générale, le rôle d'une source de connaissances est de résoudre un sous problème particulier en fonction de l'état du tableau noir.

NB : Le terme tableau noir désigne à la fois le modèle et la base partagée [Labidi et al . 93].

## Bibliographie du glossaire

- [Alliot et schiex, 93] J.-M. ALLIOT & T. SCHIEX. *Intelligence Aetificielle & Informatique théorique*, Cépaduès-Editions, 1993.
- [Ansoff, 89] H. ANSOFF. *Stratégie du développement de l'entreprise*. Paris. Editions d'organisation.
- [Anthony, 65] R. ANTHONY. *Planning and control systems : A framework for analysis*, Harvard University Press, 1965.
- [Anzieu et al . 68] D.ANZIEU et J.Y. Martin. *La dynamique des groupes*, p189.
- [Aussenac, 89] N.AUSSENAC. *Conception d'une méthodologie et d'un outil d'acquisition de connaissances expertes*. Thèse de doctorat en informatique, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [Benchimol, 86] G. BENCHIMOL, P. LEVINE, et J.C. POMEROL. *Systèmes experts dans l'entreprise*, Paris : Ed. HERMES, "Gestion et productique", mai 1986.
- [Bergson, 48] H. BERGSON. *L'évolution créatrice*, P.U.F.
- [Bond et Gasser, 88] A.H. BOND et L.GASSER. *Reading in distributed artificial intelligence*, Morgan Kaufmann publishers, Inc, 1988.
- [Bouron, 92] T. BOURON. *Structure de communication et d'organisation pour la coopération dans un univers multi-agents*, thèse de doctorat, université Paris 6.
- [Bruneau et al . 92] J-M BRUNEAU et J-F PUJOS. *Le management des connaissances dans l'entreprise : ressources humaines et systèmes d'information*, Editions d'Organisation .
- [Burlat, 96] P. BURLAT. *Contribution à l'évaluation économique des organisations productives : vers une modélisation de l'entreprise compétences*, thèse de doctorat en science économique, école des mines de St-Etienne.
- [Dausset, 90] J. DAUSSET. *La définition biologique du soi, dans soi et non-soi*, sous la direction de J.Bernard, M.Bessis, et C.Debru, Editions du Seuil.
- [Demazeau et al . 90] Y. DEMAZEAU et J.P. MULLER. *Decentralized artificial intelligence*, proceeding of the 1st modelling autonomous agents and multi-agents worlds, Cambridge : North-Holland.
- [Devlin, 91] K. DEVLIN. *Logic and information*, Cambridge University Press.
- [Durfee et Montgomery, 91] E.H. DURFEE et T. MONTGOMERY. *Coordination as distributed search in a hierarchical behavior space*, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 21, no.6, pp. 1363-, november/december 1991.
- [Falzon, 88] P. FALZON et W. VISSER. *Recueil et analyse de l'expertise dans une activité de conception, psychologique française, psychologie de l'expertise*, J.P. CAVERNI Ed., tome 33-3, Nov. 88, pp. 133- 138.
- [Farreny, 85] H. FARRENY. *Les systèmes experts : principes et exemples*, Editions Cépaduès, 1985.
- [Ferber, 95] J. FERBER. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, InterEdition.
- [Galliers, 88] J.R. GALLIERS. *A Theorical Framework for Computer Models of Cooperative Dialog, Acknowledging Multi-agent Conflict*, Open University (UK).
- [Ganascia, 91] J.G. GANASCIA. *L'hypothèse du " knowledge level " : théorie et pratique*, rapport de Laforia n 20 .
- [Hoc, 87] J.M. HOC. *Psychologie cognitive de la planification*, PUG, Grenoble, 1987.

- [Labidi et al . 93] S. LABIDI, W. LEJOUAD. *De l'IAD aux SMA*, rapport de recherche n 2004 INRIA-Sophia Antipolis.
- [Lakatos, 76] I. LAKATOS. *Proofs and refutations*, Cambridge University Press.
- [Laurière, 82] J.L. LAURIERE. *Représentation et utilisation des connaissances*, 1ère partie : Systèmes Experts, TSI Vol 1, n 1, 1982.
- [Le Moigne, 74] J.L. LE MOIGNE. *Les systèmes de décision dans les organisations*, PUF.
- [Le Moigne, 90] J.L. LE MOIGNE. *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod.
- [Lespérance et al . 95] Y. LESPERANCE, H.J. LEVESQUE et F. LIN. *Fondements d'une approche logique à la programmation d'agents*, in 3ème Journées Francophones sur l'IAD & les SMA, St-Baldolph, France 15-17 mars.
- [Malone, 88a] T.W. MALONE. *What is coordination theory*, in National Science Foundation Coordination Theory Workchop, MIT.
- [Malone, 88b] T.W. MALONE. *Modeling cooperation in organizations and markets*, in reading in distributed artificial intelligence, A.H. BOND et L.GASSER, (Eds) Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1988.
- [Malone et al . 90] T.W. MALONE et K. CROWSTON. *What is coordination theory and how it can help design cooperative work systems*, proceedings of the Conference on Computer-Supported Cooperative Work, Tora Bikson and Frank Halasz editors, pp. 357-370.
- [Mélèse, 79] J. MELESE. *Approche systémique des organisations : vers l'entreprise à complexité humaine*, Homme et Techniques.
- [Micaelli, 94] J.P. MICAELLI. *Contribution à une ingénierie économique des systèmes de production : fondements et expérimentation*, thèse de doctorat en sciences économiques, Université Lumière Lyon 2.
- [Mintzberg et al . 76] H. MINTZBERG, D. RAISINGHANI et A. THEORET. *The structure of 'instructured' decision processes*, Administrative Science Quarterly, 21, 1976.
- [Mintzberg, 79] H. MINTZBERG. *The structuring of organizations : a synthesis of the research*, Prentice-Hall.
- [Moraitis, 94] P. MORAITIS. *Paradigme multi-agent et prise de décision distribuée*. Thèse de doctorat en informatique, université Paris-Dauphine.
- [Newell, 82] A. NEWELL. *The knowledge Level*, Artificial Intelligence, 18(1), p. 87-127.
- [Nicolet et al . 84] J.L. NICOLET et J. CELIER. *La fiabilité humaine dans l'entreprise*, Edition Masson.
- [Pitrat, 90] J. PITRAT. *Métaconnaissance. Future de l'intelligence artificielle*, Editions Hermès.
- [(De) Rosnay, 75] J. DE ROSNAY. *Le macroscopie : vers une vision globale*, Edition du Seuil.
- [Searle, 83] J.R. SEARLE. *Intentionality : An Essay in the philosophy of mind*, Cambridge University Press, New York.
- [Searle, 90] J.R. SEARLE. *Intention in communication*, chapter 19 : Collective Intentions and actions, pp. 401-415. MIT Press, London.
- [Simon, 60] H.A. SIMON. *The new science of management decision*,
- [Van Gigch, 74] J. P. VAN GIGCH. *Applied general system theory*, Harper & Row publishers, New York, 74.

**[Van Gigch, 87]** J. P. VAN GIGCH. *Decision making about decision making : Metamodels & meta systems*, Abacus Press, Cambridge, Mass., 1987.

**[Van Gigch, 91]** J. P. VAN GIGCH. *System design modeling and metamodeling*. Plenum Press, New York, 91.



## **RÉSUMÉ**

L'objectif de cette thèse est de modéliser les processus de prise de décisions dans les organisations productives en mettant l'accent sur la communication, la coopération, la négociation et surtout l'amélioration par l'apprentissage du comportement des acteurs décisionnels.

Les entreprises font depuis plusieurs années des efforts importants pour étudier et développer une stratégie essentiellement orientée sur la réactivité. Cette stratégie nécessite un rapprochement entre la structure physique et la structure décisionnelle, ce qui entraîne une redistribution de la décision aux différents niveaux d'une organisation et un accroissement d'autonomie de ses acteurs décisionnels.

Pour mettre en évidence cette réalité, nous insistons sur des facteurs clefs tels que la complexité des organisations productives qui sont à l'intersection de différents domaines (économique, sociologique, technologique, etc.), les mécanismes de prise de décisions distribuées, les phénomènes d'orientation de décisions, et l'apprentissage qui est une aptitude et une faculté indispensable à tout système dynamique et évolutif.

Ainsi, dans ces travaux nous proposons premièrement la modélisation des organisations productives, et en particulier de leurs processus décisionnels en se basant sur les concepts des systèmes multi-agents, deuxièmement la modélisation et la formalisation des connaissances des acteurs décisionnels, et enfin l'apprentissage de nouvelles connaissances en vue de la prise de nouvelles décisions dans des contextes ou des situations analogues en adoptant la méthode de raisonnement à partir de cas.

Ces hypothèses sont validées par la construction d'une maquette de simulation qui repose sur l'implémentation du flux décisionnel à travers des règles de décisions et une architecture de représentation de connaissances (base de cas), et du flux physique par l'utilisation des techniques de simulation à événements discrets. Enfin cette maquette a été appliquée au cas d'une entreprise industrielle.

## **MOTS-CLÉS**

Organisation productives, Prise de décision, Systèmes Multi-Agents, Apprentissage en IAD, Raisonnement à partir de Cas.